

博士論文

マルチバイオメトリクス導入による
歩行動作特徴を考慮した個人認証法

公立はこだて未来大学大学院
システム情報科学研究科 システム情報科学専攻

今野 慎介

2016 年 3 月

Doctoral Thesis

A Personal Authentication Method Based on Features of Walking
Motion with Multibiometrics

Shinsuke Konno

Graduate School of Systems Information Science
Future University Hakodate
Mar. 2016

要旨

スマートフォンをはじめとした携帯端末は、不正利用から守るためのセキュリティ機能が強化され続けている。個人認証機能もその一つであり、従来の personal identification numbers (PINs) による認証から、近年は不正解除が困難なパターンロックや指紋認証などを搭載した機種も存在している。しかしながら、その操作の煩わしさが原因となり、約半数のユーザは個人認証機能を利用していないとの報告が、複数のニュースやアンケートでなされている。

この問題を解決するため、個人認証機能の利用時に感じる不便さや煩わしさを軽減する目的で、端末を振る動作やディスプレイを軽く触れるタップなど、簡単な動作を基に個人認証を行う研究がされてきた。しかしながら、これらの認証法は意識的な認証動作を行う必要があり、ユーザが感じる煩わしさを完全に解決することはできない。その一方で、日々繰り返される動作により、個人認証を確立できる可能性も存在する。そのような認証手法は、意識的な操作とは関係なく、バックグラウンドで端末のロック解除を行うことが可能となる。本研究で対象とする歩行動作に基づく認証も、このような認証法の一つである。

本研究は、ユーザが認証操作に対して感じる煩わしさを無くすために、認証操作と意識しない動作である歩行動作を基に個人認証を行う手法（以下、歩行認証）について研究を行うものである。歩行認証は、歩行動作をウェアラブルセンサを使用して計測する。ユーザは歩行中であれば、意識的な認証操作することなしに、スマートフォンのロックを解除することができる。歩行認証の従来研究は、認証精度の低さや、日常生活に取り入れることが困難な部位で歩行動作の計測を行っていた問題があった。本研究は、ユーザが煩わしさを感じずに受け入れ可能な端末所持部位としてズボン前ポケットを採用する。本研究の目的は、ズボン前ポケットにおいて高精度な認証法を確立することである。本研究では、認証精度低下の複数の要因に対応するために、1つの認証システムに、以下の複数の手法を適用する。

1. SVM を用いて本人／本人以外の認証を行う際に、入力信号とテンプレート信号間で算出した以下の複数の距離を特徴量とすることにより、認証精度を改善する。
 - (1) 3 軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離
 - (2) 角速度信号のマンハッタン距離
 - (3) 加速度信号のマンハッタン距離

また、認証精度向上に寄与する信号間距離を取得するために、以下の手法を歩行認証のプロセスへ導入した。

2. 時間領域における認証用信号の抽出手法
3. テンプレート信号の複数選出による照合手法

各提案手法の詳細は以下のとおりである。

1. SVM を用いた複数の距離を特徴量とする認証法

認証システムの基礎となる提案手法は、マルチバイオメトリクスの 1 手法であるマルチセンサを採用した。本研究におけるこの認証法は、身体の一部に取り付けた複数センサ（加速度・角速度）の信号から得た複数の距離を基に、SVM を用いて認証を行う。従来研究の多くは単一のセンサを使用して様々な特徴量を用いた認証法が試みられていたが、被験者数が多い場合は十分な認証精度は得られていなかった。その一方、身体複数の部位にセンサを取り付けた従来研究は高い精度を報告していたが、ユーザにとって負担の大きな認証法となる。一つのスマートフォンに複数のセンサを搭載することは可能であり、ユーザは煩わしさを感じることなく、体の一個所に身に付けた複数のセンサを使用した認証を実現できる。

単一センサを用いた従来研究において、類似度や距離に基づいた認証法の方が、信号から抽出した特徴量による認証法より優れた性能を示していた。この結果は、歩行認証には振幅情報だけでなく時間情報も重要であることを示していると考えられる。従来研究においては、距離を特徴量とする識別器を用いた認証法は試みられていなかった。このことから、Dynamic Time Warping (DTW) を使用して計算された複数センサ信号の信号間距離を基に SVM によってユーザの認証を行うスコアレベル Fusion を導入することを提案した。この手法に加えて、異なるタイプのセンサによって計測された信号は異なる特性を持つので、それぞれのセンサのタイプに合わせた以下の最適な距離計算法を提案した。

(1) 3 軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離

加速度は運動の中心からの距離に比例する。脚を振る動作を円運動と見なし、加速度信号間距離は 3 軸加速度ベクトルの方向の違いを距離として計算した。

(2), (3) 角速度信号及び、加速度信号のマンハッタン距離

各センサでは測定される信号の性質が異なることから、センサの種類に応じた最適な信号間距離計算法を適用することを提案した。単一軸の角速度信号と加速度信号の距離は

予備実験の結果を基に、2乗平均平方根（RMS）で振幅を正規化した後に距離計算を行った。

2. 時間領域における認証用信号の抽出手法

信号間距離の計算には、認証用信号を正確に抽出することが重要である。極大値の選出とDTWを組み合わせた時間領域での信号のセグメンテーション手法を導入した。

3. テンプレート信号の複数選出による距離計算法

信号の多様性に対応するためにテンプレート信号数を複数使用し、1周期の入力信号との間で求めた距離の中央値とした。

複数の提案手法を組み込んだ認証システムの最高精度は被験者が50人の場合は、equal error rate (EER) の値が0.6%であった。更に、より実際の使用環境に近いデータを用いて認証精度の検証を行うために、実際の使用状況に近い状況下で17人の被験者から収集したデータに提案システムを適用した結果を、この論文では報告した。この実験における提案システムは高い認証精度を保った。その最高精度はEER=0.2%であった。これらの実験結果は、身体の一部にセンサを装着した従来研究と比べて、提案システムは利便性を損なうことなく、高い精度で認証できることを示した。これらの結果により、本研究で提案する歩行認証システムは、ユーザが感じる認証操作の煩わしさと、低い認証精度の2つの問題を解決することができ、ユーザにとって受け入れ易い認証法として実現可能であることを示すことができた。

キーワード：歩行認証，スマートフォン，加速度センサ，角速度センサ，dynamic time warping，マルチセンサ，マルチサンプル，スコアレベル fusion

Abstract

Security functions of portable terminals such as smartphones have been improved to prevent imposters from misusing them. One of these security functions is the personal authentication function. The conventional method is personal identification numbers (PINs). Recently, personal authentication functions such as pattern locks and biometrics authentication such as finger prints, which are more difficult for imposters to break, have been installed in devices. However, some news and questionnaires reported that about 50% of users did not use personal authentication functions in their devices. They also reported that a principal cause of a low utilization rate is the inconvenience of requiring authentication operations for users.

To reduce the inconvenience caused by authentication operations in portable terminals, some methods based on behavioral characteristics have been studied. Previous studies proposed easier authentication methods by extracting individual features of device operation, such as swinging the terminal or tapping on the display. However these methods require conscious action, so they cannot perform authentication in the background. On the other hand, personal authentication methods can be established based on daily repeated motions. These methods can authenticate users without any conscious operations in the background.

To reduce the inconvenience, we designed a personal authentication method (gait-based authentication) based on users' walking motions that users did not regard as authentication operations. The walking motion was measured in the gait-based authentication by using wearable sensors. Users could unlock their smartphones without conscious authentication operations while walking. Previous studies of gait-based authentication had two issues. The first one was low authentication accuracy, and the other was authenticating users with unacceptable sensor positions for daily use. We adopted a trouser front-pocket as the sensor position for users because they could use the terminal without needing special tools. The purpose of this study was to establish a gait-based authentication method with high accuracy at this position. In this study, the following multiple methods were applied into one authentication system to deal with multiple causes of decreases in authentication accuracy.

1. The proposed method improves authentication accuracy by using the following multiple distances calculated between input signals and template signals, as features, when identifying genuine users or imposters using a support vector machine (SVM).

- (1) Distance based on the difference in direction between three-axis acceleration vectors
- (2) Manhattan distances between angular velocity signals
- (3) Manhattan distances between acceleration signals

The following methods were introduced to obtain the distances that improve the authentication accuracy.

- 2. An extraction method for quasi-periodic signals in the time domain
- 3. A distance calculation method using multiple template signals

The details of these methods are as follows.

1. Authentication Method using SVM based on Multiple Distances

The method used as the basis for this system has a multi-sensor platform, which is one method of multibiometrics. This authentication method identifies users based on multiple distances calculated between signals from multiple sensors (a three-axis acceleration sensor and a three-axis gyro sensor) attached to a part of the user's body with a SVM. Previous studies that used one wearable sensor had low authentication accuracy, while studies that attached multiple sensors to various body parts had high authentication accuracy. However, users feel attaching sensors on different parts of their bodies to be inconvenient. One terminal can be equipped with multiple sensors, enabling us to authenticate using multiple sensors without imposing a burden on users.

In the uni-sensor authentication of previous studies, methods based on the similarity or distance outperformed methods based on features extracted from signals. These results indicate that not only amplitude information but also time information in gait-based authentication is important. In previous studies of gait-based authentication using in-pocket sensors, the method using classifiers with distances as features was not adopted. Therefore, this study proposes a method introducing score-level fusion that identifies users by SVM based on distances calculated between signals of multiple sensors with dynamic time warping (DTW). In addition to this method, because signals measured by different types of sensors have different properties, the following appropriate distance calculation methods for each type of sensor were proposed.

(1) Distance based on difference of direction between Three-Axis Acceleration Vectors

In a circular movement, acceleration is directly proportional to the distance from the center of the movement. The motion of swinging a leg is regarded as a circular movement, and the distances between acceleration signals are calculated based on the differences between three-axis acceleration vectors instead of the differences in amplitudes.

(2), (3) Manhattan distances between angular velocity signals and acceleration signals

The distance between angular velocity signals is calculated between signals normalized by root mean square (RMS) based on the results of the preliminary experiment. Just like with angular velocity signals, the distance between acceleration signals was adopted as the method of measurement based on the results of the preliminary experiment.

2. Extraction Method for Quasi-periodic signal in Time Domain

In the distance calculation between signals, signals for authentication need to be extracted exactly. A segmentation method combined with the local maxima and DTW was proposed.

3. Distance Calculation Method using Multiple Template Signals

To adapt to the variation in signals from individual various walking motion, the proposed multi sample method obtains the median value from multiple distances calculated among multiple templates and one input signal.

The authentication system introducing multiple proposed methods showed that the equal error rate (EER) that was generally used as the performance evaluation index of biometrics was 0.6% in an evaluation with 50 subjects. Furthermore, the effectiveness of the proposed method was evaluated in the actual environment. The results of the system applied to the data collected from 17 subjects in the conditions approximated to an actual use situation showed that our system kept high authentication accuracy. The best EER from the proposed method was 0.2%. These results outperformed the previous authentication methods that identify users having one sensor worn on one part of the body. The results demonstrated that our methods could resolve the two issues, which are the inconvenience imposed on users and the low authentication accuracy. Thus, gait-based authentication is an acceptable authentication method for users.

Keywords: gait-based authentication, smartphone, acceleration sensor, gyro sensor, dynamic time warping, multi-sensor, multi-sample, score-level fusion

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	バイオメトリクス認証	4
1.2.1	バイオメトリクス	4
1.2.2	認証の分類	4
1.2.3	認証に使用する身体情報の分類	6
1.3	バイオメトリクス認証システム	11
1.3.1	バイオメトリクス認証システムの処理フロー	11
1.3.2	バイオメトリクス認証システムの性能評価方法	15
1.3.3	マルチバイオメトリクス	19
1.4	本研究の問題設定	22
1.4.1	本研究で採用する認証方式	22
1.4.2	歩行認証のプロセスと技術的課題	22
1.5	研究目的と本論文の構成	26
第 2 章	関連研究	28
2.1	音声の認識	28
2.2.1	音声の認識手法	28
2.2	歩行動作に基づく個人認証に関する研究	36
2.3	歩行認証の従来研究	37
2.3.1	従来研究の認証手法	37
2.3.2	認証法の分類と考察	43
2.4	歩行認証の問題点とその要因	45
2.4.1	歩行動作信号の性質による精度低下の要因	47
2.4.2	加速度センサにおける精度低下の要因	49
2.4.3	角速度センサにおける精度低下の要因	52

第 3 章	提案手法	54
3.1	本研究の提案手法	54
3.2	認証システムの概要	60
3.3	認証システムの実装	62
3.3.1	測定信号の平滑化	62
3.3.2	認証用信号のセグメンテーション処理	62
3.3.3	振幅正規化	64
3.3.4	距離計算	64
3.3.5	ユーザ共通識別器	67
3.3.6	特徴ベクトルと認証	69
第 4 章	提案手法の評価	70
4.1	実験 1 ポケットに装着したセンサにおける認証性能の評価	70
4.3.1	歩行信号の測定	70
4.3.2	データセットと実験設定	73
4.3.3	提案手法による認証精度の評価	75
4.3.4	従来手法による認証精度の評価	77
4.2	実験 2 センサの入れ直しを行ったデータにおける認証性能の評価	81
4.2.1	歩行信号の測定	81
4.2.2	データセットと実験設定	83
4.2.3	評価結果	84
4.3	まとめと考察	87
第 5 章	結論	89
	謝辞	91

付録 A 端末所持部位の違いによる認証精度の比較	93
A.1 歩行信号の計測と分析	93
A.2 認証用信号の抽出法	99
A.3 認証方法	105
A.4 実験	107
A.5 まとめ	111
付録 B 同一歩行動作区間における信号抽出のための予備実験	112
B.1 歩行周期	112
B.2 歩行動作の測定方法	113
B.3 測定結果と歩行動作の分析	114
付録 C 本研究で採用した歩行動作信号のセグメンテーション手法	116
C.1 信号の平滑化	116
C.2 準周期信号の抽出	116
付録 D 単一センサ・単一軸信号による認証度向上法の予備実験	120
D.1 高精度化に寄与する信号の整合手法と距離計算法の検討	122
D.2 高精度化に寄与する振幅の正規化手法の検討	126
D.3 高精度化に寄与するフィルタ点数の検討	128
D.4 まとめ	130
付録 E 実環境を模擬したデータセットにおける単一軸信号認証精度の評価	131
参考文献	134
研究業績	143

目次

第1章

図 1-1	モダリティの分類	7
図 1-2	一般的なバイオメトリクス認証の処理フロー	12
図 1-3	FRR と FAR の例	17
図 1-4	ROC 曲線の例	18
図 1-5	ポケットに収納した加速度センサで観測された歩行動作時の加速度信号	24
図 1-6	歩行認証において対応が必要な技術的課題	24

第2章

図 2-1	音声認識の処理フロー	29
図 2-2	句境界検出の概要	30
図 2-3	ラグ窓法の処理フロー	32
図 2-4	抽出された「雨」のピッチパターンの比較	33
図 2-5	同一人物から取得した歩行加速度信号	44
図 2-6	歩行運動を単純化した動作モデル	49

第3章

図 3-1	提案する認証システムの処理フロー	61
図 3-2	提案するセグメンテーションの処理フロー	62

第4章

図 4-1	多機能センサユニット TSND121 外観	71
図 4-2	被験者へのセンサ装着図	72
図 4-3	測定コース	72
図 4-4	マルチセンサ認証における ROC 曲線	76
図 4-5	従来認証法における ROC 曲線	72
図 4-6	スマートフォンケースにセンサ端末を固定した様子	82
図 4-7	提案手法の ROC 曲線	85

図 4-8 距離入力 3 (特徴ベクトル 7 次元) と比較認証法の ROC 曲線	86
---	----

付録 A

図 A-1 センサ装着の様子, (a)ズボン左前ポケット, (b)左腰側面	95
図 A-2 測定コース (函館高専 1 階廊下)	95
図 A-3 歩行時に測定された 3 名の被験者の加速度信号	97
図 A-4 歩行時に測定された 3 名の被験者の加速度信号	97
図 A-5 準周期信号抽出手順(2)	100
図 A-6 準周期信号抽出手順(3)	100
図 A-7 被験者 A の抽出された X 軸加速度準周期信号	101
図 A-8 被験者 A の抽出された Y 軸加速度準周期信号	101
図 A-9 被験者 A の抽出された Z 軸加速度準周期信号	101
図 A-10 被験者 A の抽出された X 軸角速度準周期信号	102
図 A-11 被験者 A の抽出された Y 軸角速度準周期信号	102
図 A-12 被験者 A の抽出された Z 軸角速度準周期信号	102
図 A-13 被験者 A, B, C の抽出された X 軸加速度準周期信号	103
図 A-14 被験者 A, B, C の抽出された Y 軸加速度準周期信号	103
図 A-15 被験者 A, B, C の抽出された Z 軸加速度準周期信号	103
図 A-16 被験者 A, B, C の抽出された X 軸角速度準周期信号	104
図 A-17 被験者 A, B, C の抽出された Y 軸角速度準周期信号	104
図 A-18 被験者 A, B, C の抽出された Z 軸角速度準周期信号	104
図 A-19 本章実験における認証の流れ	106

付録 B

図 B-1 歩行のフェーズ	113
図 B-2 2 個の力センサを装着した様子	114
図 B-3 3 名の被験者の測定信号	115

付録 C

図 C-1	T_0 から一定時間内にある極大値とその時間	117
図 C-2	T_1 から一定時間内にある極大値とその時間	118
図 C-3	提案手法の適用による準周期信号の抽出例	118

付録 D

図 D-1	単一軸信号による認証処理のフロー	121
-------	------------------	-----

表目次

第1章

表 1-1	実用化されている生体認証技術	10
-------	----------------	----

第2章

表 2-1	従来研究の認証手法と報告された EER[%]	42
-------	------------------------	----

第3章

表 3-1	提案する単一センサ単一軸信号における距離計算手法の各種設定	58
-------	-------------------------------	----

第4章

表 4-1	TSND121 基本仕様[26]	71
表 4-2	測定条件	73
表 4-3	各センサ単一軸の信号に対する距離計算法の設定条件	74
表 4-4	3 軸加速度角度差に対する距離計算法の設定条件	74
表 4-5	提案手法の EER	76
表 4-6	音声認識手法の設定	78
表 4-7	従来研究認証手法の設定	78
表 4-8	DTW 距離と SVM による認証の設定	78
表 4-9	比較手法の EER	80
表 4-10	測定条件	82
表 4-11	測定装置の寸法	82
表 4-12	各認証手法の EER[%]	85

付録 A

表 A-1	測定条件	94
表 A-2	データセットと認証法	107
表 A-3	加速度センサによる EER[%]	109
表 A-4	3 軸加速度角度差による EER[%]	109
表 A-5	角速度センサによる EER[%]	110

付録 B

表 B-1	測定条件	113
-------	------	-----

付録 C

表 C-1	準周期信号抽出に使用したパラメータ	119
-------	-------------------	-----

付録 D

表 D-1	実験条件	124
表 D-2	検証した整合法と距離計算法	125
表 D-3	DTW により整合を行い距離計算した EER[%]	125
表 D-4	線形補間により整合を行い距離計算した EER[%]	125
表 D-5	正規化手法ごとの EER[%]	127
表 D-6	単一センサ単一軸の信号におけるフィルタ点数ごとの EER[%]	129
表 D-7	加速度 3 軸角度差における Savitzky-Golay の点数ごとの EER[%]	129
表 D-8	線形補間と正規化相互相関の組み合わせによる EER[%]	129
表 D-9	本検討により採用した、単一軸信号における距離計算手法	130

付録 E

E-1	DTW 距離を基にした認証法の設定条件	132
E-2	本研究で採用した DTW と最適な距離計算法による EER	133
E-3	線形補間と正規化相互相関の組み合わせによる EER	133

第 1 章 序論

1.1 研究背景

人間は何をもって、人物が誰であるかを特定するのだろうか。普段、我々が人を識別する時は、見覚えや聞き覚えのある「顔」や「声」だけを基に判断することが殆どである。遠くから人物を眺めている時はその人物の「仕草」や「背格好」のみで特定することもある。しかしながら、自分のことを誰も知らない状況で、自分が誰であることを証明することは容易なことではない。そのために、我々は免許証やパスポートなど、自分が誰であることを証明するものを持ち歩いている。しかしながら、それらの公的な本人証明書は、盗難や偽造により悪用されていることがあるのは周知の事実である。そのため、複製をし難くしたり、本人以外が使用できない様にしたりするなどの改良が重ねられ続けている。このような努力にも係わらず、本人証明書の偽造や悪用に関わる犯罪は現在でも発生している。本人証明書の悪用は古くから行われてきたが、その根本的な解決は未だ達成できないまま、現在も使われ続けていると言える。

この問題を解決するために、近年、その人が持つ固有の身体情報・生体情報を基に、その人であることを証明する技術が様々な場面で使用されるようになって来ている。所謂、バイオメトリクス認証である。その中でも「指紋」は最も有名な身体的特徴の一つであり、古くから本人の同定に使用されてきた。日本においても、拇印の習慣が未だに残っている。二十年ほど前までは指紋は警察における犯罪捜査での利用が有名であった。「指紋」は、ただ一人の人物を特定できる特徴を有していると知識としては広く知られているものの、一般の人が指紋認証を利用する機会はなかったと記憶している。しかし、それ以降、指紋認証に代表されるバイオメトリクス認証は現在までに急激な速度で一般生活への導入が進んでいる。指紋だけではなく、「手の静脈パターン」や「光彩」、「顔」など、様々な生体認証技術が研究・開発され、銀行の ATM での利用をはじめとした、我々の生活の様々な場面に導入が進んでいる。

近年、スマートフォンをはじめとした携帯端末を活用する場面はますます広がっている。通話や、Web を閲覧するといっただけの使用方法から、ショッピングなどでの支払いやビ

ビジネスでの活用，搭載したセンサによるライフログの収集やその情報を基にしたサービスの提供といったことが行われている．また，スマートフォンをドアの「鍵」として利用する技術も登場している[1][2][3]．

それに伴い，スマートフォン自体の重要性は高まり，悪用を防ぐためにセキュリティを高める機能が様々，実装されている．個人認証法もその一つとして挙げられ，従来の PIN (Personal Identification Number) による認証から，パスワード，パターンロックなど，他人による不正な解除がより困難となる認証方法が実装されている．また，身体的特徴を利用したバイオメトリクス認証機能の搭載も行われており，顔による認証機能や，機種によっては指紋認証機能を搭載しているものも存在する．このように，不正利用を防ぐための努力が行われる一方で，そのセキュリティ機能の利用が進まないという調査やニュースが複数なされている[4][5][6]．また，これらの報告では低い利用率の主な原因は，認証操作の煩雑さであるとされる．つまり，認証操作を行うための手間や時間，それらによって感じる認証操作の煩わしさがユーザを認証機能の利用から遠ざける主要な要因となっていると考えられる．

複雑な入力を省くために，より簡単な行動，例えばジェスチャ認証技術[7]を応用して個人認証を行う研究[8][9][10][11]や，タッチパネルを軽く叩く「タップ」操作から個人の特徴を捉え，個人認証を行う研究[12]，それらの操作を組み合わせた認証法[13]などが報告されている．しかしながら，これらの方法は意識的に認証のための動作をする必要があり，個人認証に関わる操作を完全に無くすことはできない．

顔認証についても Android には標準機能としての搭載が進んでおり[14]，その利便性も高まっている．しかしながらカメラで顔を映すという認証動作を行う必要があり，自動改札機での支払いや，セキュリティゲートの鍵としてスマートフォンを使用する場面などを想定した場合は，瞬時に端末の認証を行う必要があるため，認証操作を伴う個人認証法は適していない．ユーザが「無意識」にのうちに「自動的に」個人認証を完了してしまう認証法が存在すれば，さらに利便性は高まると考えられる．

一方，日常的に繰り返し行う行動によって，個人認証が可能となれば，意識的に認証操作をする必要がなくなるという考えを基に，個人認証を行うアプローチも存在する．本研究で取り扱う歩行動作による認証（以下，歩行認証）がこの手法に当たる．この認証法は，ユーザが身に付けた加速度センサ等で歩行動作を計測して，個人認証を行う．歩行動作は成人男性で 1 日平均 7099 歩との調査報告[15]がされており，歩行動作は日常において様々

な場面で行われている。歩行認証が実現できれば、歩行中やその直後であれば、認証のための操作をしなくても、個人認証を完了させることが可能となる。あたかも自動的に認証がなされたようにユーザは感じ、認証機能に対してユーザが感じていた煩わしさを軽減することが可能と予測される。

もちろん、日常生活において人間は常に歩行をしている訳ではない。したがって、歩行認証が実現、実装された場合も、全ての場면을歩行認証によってカバーすることは不可能であり、歩行していない状態でも利用可能である他の認証方法との併用が必要と考えられる。しかしながら、日常生活において、端末を身に付けた状態で歩行を行い、その後端末を取り出して使用するといった場面は多く存在する。前述の自動改札や、レジに向かって歩いて行き、端末を取り出して支払いをするといった場面などが考えられる。このような場面でロックを解除する操作が不要になれば、利便性が高まると考えることができる。

また、歩行認証は、スマートフォンの個人認証以外の用途でも研究が行われている。一例として自動車の鍵に歩行認証を実装し、乗車の際の人物確認とともに人物ごとのサービスを提供することが提案・研究されている[16]。

更に、歩行認証は所持者が歩いている限りは、端末を所持している人物が本当の所有者であるかを自動的に判断することが可能となる。前述の車の鍵のように、本来は所有のみが使用権限を持つ物を、本人以外の人物が不正に取得して持ち歩いたり、利用したりすることを歩行認証により瞬時に検出して防ぐことができ、継続認証[17]の1種としての利用法も考えられる。

本論文は、歩行認証技術確立のために行った研究成果について報告するものである。

1.2 バイオメトリクス認証

1.2.1 バイオメトリクス

指紋に代表される生体情報を用いた認証法であるバイオメトリクスは、今や技術者や研究者だけではなく、一般の人びとの生活にも深く浸透した言葉となっている。パソコンやスマートフォン、銀行の ATM など、生体認証の利用場面は広く一般生活に普及している。生体の特徴を用いた認証法は「バイオメトリクス」という言葉として知られている。「バイオメトリクス」という言葉は指紋などの生体情報を示す場合と、生体情報を用いた個人認証法までを指す場合が存在する。したがって、前者の例を採用した場合、バイオメトリクス認証という言葉が成立する。生体が持つ特徴と、認証技術を「バイオメトリクス」と言う一つの言葉で表現するのは誤解を招く恐れがある。本論文では曖昧さを避けるため、指紋などの特徴をバイオメトリクスと表記し、認証技術を指す場合は「バイオメトリクス認証」と表記することとする。

1.2.2 認証の分類

バイオメトリクス認証は、個人認証技術の一つである。バイオメトリクス認証の一般生活における普及は近年の事であり、それ以前は、そして現在においてもバイオメトリクス認証には分類されない他の認証法が広く使用されている。認証法は照合する対象により以下の3つの方式に分類される[18][19]。

本人の所有物による認証

磁気カードや IC カードによる認証法である。最近ではスマートフォンを認証に用いる事例も存在する。盗難や偽造に対して弱く、例えばクレジットカードではスキミングと言われる「磁気記録情報を不正に読み出してコピーを作成し、使用する犯罪行為」が発生している。

本人の知識による認証

PIN やパスワードが代表例である。システムとして実現するのは簡単であるが、複雑すぎるものは、認証を行う本人が忘れてしまう可能性が存在し、単純なものだと辞書攻撃や総当たり攻撃で簡単に破られる可能性がある。また、盗み見られることに対し

ても弱い。

バイオメトリクス認証

本人が持つ特徴を用いた認証である。所持や記憶することが不要であるため簡便であるが、使用のためには特殊な装置や高度な処理が必要となる場合が多い。

検証と識別

認証は更にその処理の違いにより「検証」と「識別」という言葉が存在し、区別されている。バイオメトリクス認証システムの役割として、生体の特徴を基に利用者をシステムが「認証」するが、その処理内容の違いにより以下の2つに分類されて使用される[20][21]。

(1) 検証 (Verification)

ID とその特徴が事前にシステムに登録されている場合において、ある ID と特徴をシステムへ入力した人物を、システムに事前登録された同一 ID の特徴と比較することにより、本当に同一人物であるかを確認する処理を指す。事前登録された特徴と、入力された特徴との間で類似度を求め、予め設定した閾値を満たした場合のみ、同一人物と判定する。ID の人物であるか、否かだけを判定する。

(2) 識別 (Identification)

特徴が入力されたときに、システムに事前登録された複数の人物の特徴と比較し、それが誰であるかを決定することを指す。入力されたデータと登録されている特徴との間の類似度が閾値を満たす人物の中から、最も類似度が高い人物であると判定する。

識別は ID レス認証とも呼ばれる[22]。ユーザが生体情報のみを入力し、あらかじめ DB 等に登録されているユーザとの類似度や距離を求めることで、ユーザを一意に識別するものである。人物を示す ID やカードといったものを提示する必要があるため利便性は高いが、全ユーザと照合を行う必要性が生じる。N 人のユーザと照合する必要があることから 1 : N 認証とも呼ばれる。N 人の人物と照合を試みるため、登録人数増加に伴い、誤認識率も増加し易い問題が存在する。

一方、検証については、ID を基にその人物のテンプレート信号（または特徴）と入力さ

れた信号（または特徴）を照合することができる．1：1 認証とも呼ばれる．

認証と類似した処理を行う言葉として認識（パターン認識）が存在する．「観測されたパターンをあらかじめ定めた複数の概念のうちの一つに対応させる処理」 [23]のことをパターン認識という．概念の事をクラスと呼び，例えばアルファベットを識別する問題であれば大文字小文字を合わせて 52 個のクラス（アルファベット以外も判定するならば 53 個）が存在すると言える．識別や検証は，登録済みの人物の中から誰であるかという判断を行うパターン認識の処理を行っているといえることができる．

1.2.3 認証に使用する身体情報の分類

バイオメトリクス認証に用いられる身体部位の事をモダリティと呼ぶ．モダリティは大きく分けて 2 つに分類される[23]．一つは，指紋，虹彩，静脈，DNA など個人を特定可能な，その人物が持つ物理的特徴であり，身体的特徴と呼ばれる．

もう一つは，声や署名，本研究で採用する歩行動作による信号など，何らかの行動に伴って生成された信号の事である．これらは行動的特徴と呼ばれる．行動的特徴はその時々により，同一人物においても変化が生じることから，身体的特徴に比べて認証精度が低いことが課題として挙げられる．図 1-1 にモダリティの分類について示す．

以下に，代表的なモダリティとその特徴について述べる．

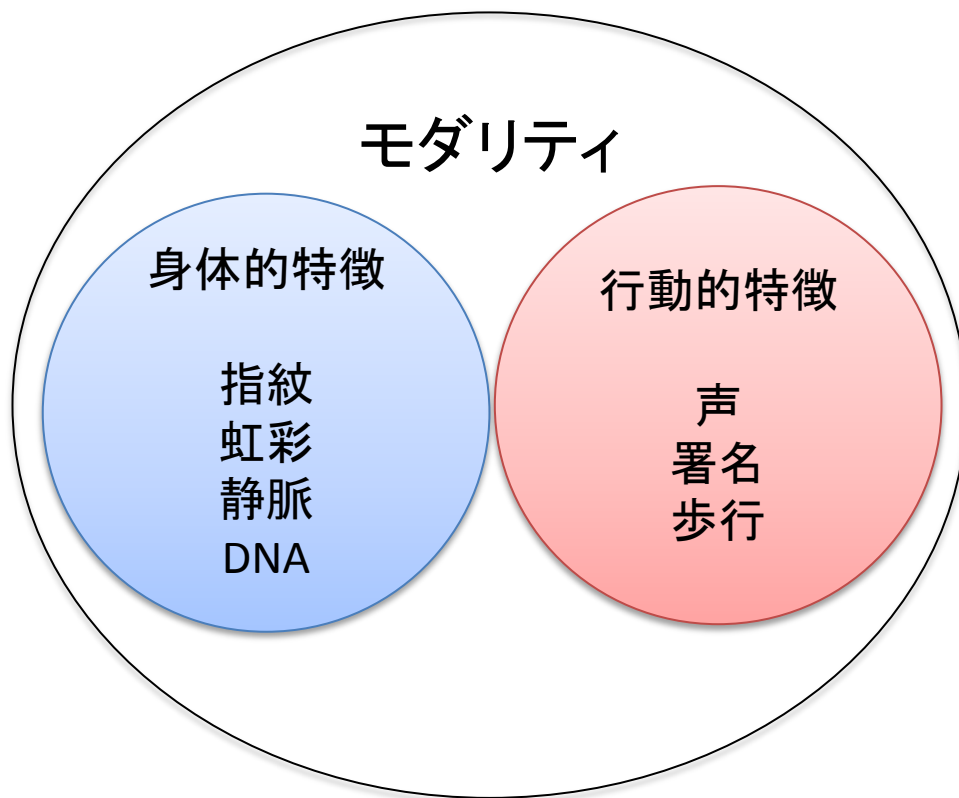


図 1-1 モダリティの分類

● 身体的特徴

指紋

指紋は世界中を探しても同一の指紋を持つ人物はおらず、また一生変わらないと言われている身体的特徴である。遙か昔より人を唯一に識別できる可能性が認識されていたものの、20世紀の初めまではシステマティックに利用される動きはなかった。1970年代、アメリカ合衆国において自動化された指紋認証システム AFIS (Auto Fingerprint Identification System) が認証精度と効率を改善するために開発された。その後、1985年頃から原子力発電所などの入退室の管理システムとして利用されるようになった。指紋は犯罪捜査における利用が広く知られていたが、現在は、装置の小型化も進み、スマートフォンやパソコンなど一般の人が使用する製品にも搭載されている。

顔

我々が日常生活において、自然に実践している識別部位である。顔はカメラで撮影できるため、直接、センサを接触させることなく測定が可能である利点が存在する。現在、顔認証はスマートフォン (Android 4.0 以降) にも標準搭載されている。欠点としては、部屋の明るさや眼鏡装着の有無、顔の向き、髪の毛、容姿が酷似した一卵性双生児の存在など、認証精度に影響を与える要素が多く存在することである。

虹彩

虹彩は所謂「黒目」のうち、瞳孔を除いた外側に存在するドーナツ状の部位のことである。人の目は生後2年まで、瞳孔から外側に向かって皺が発生する。その後は変化が生じないと言われている。同一人物であっても左右で異なり、一卵性双生児でも同じとなることはない特徴として知られている。高い精度で個人認証が行える特徴であるが、欠点として、他のモデルティと比較すると測定装置が大型化していることや、虹彩を測定することに対するユーザの心理的な抵抗が大きいことが挙げられる。

静脈

「手のひら」や「指」などの静脈のパターンを使用して認証を行う。近赤外光を指に照射し、その透過光から得られる画像を基に静脈のみを抽出して認証に用いる。血液中のヘモグロビン近赤外光吸収する性質を用いて静脈の画像を撮影する。静脈パターンは部位

の外観からは観察できないため、偽造がし難いと言われている。

DNA

人間の DNA は約 30 億の塩基配列からなり、個人ごとに異なり生涯不変である。犯罪捜査など、高精度に個人を識別することが必要となる分野を中心に導入されている。欠点としては識別をするために時間がかかり、処理も化学薬品を使うなど特殊であることが要因となり、日常生活に導入することが難しい点が挙げられる。

● 行動的特徴

声（声紋）

音声信号の周波数成分から声紋を抽出し、事前に登録した同じ言葉の声紋と照合を行い、話している人物の認証を行う。スペクトルの表現として対数パワースペクトルに対して周波数変換を更に行ったケプストラムが用いられることが多い。音声認証についても、Android への標準搭載が始まっている。屋外で利用する場合の雑音の影響など、周囲の環境に精度が左右されやすいことが欠点として挙げられる。

署名

オフライン署名認証とオンライン署名認証の 2 種が存在する。オフライン署名認証は、既に書かれた署名の文字画像を比較することで認証を行う方式である。一方、オンライン署名認証は、署名中に座標や筆圧、加速度などを計測し、そのデータを基に認証を行う認証方式である。

歩行

測定に用いるセンサにより様々な方式が存在する。代表例として、カメラで歩行動作を撮影し、その歩く動作の様子から個人の識別を行う歩容認証が存在する。本研究の対象である歩行認証は、身に付けたセンサにより計測した情報を基に認証を行う。

表 1-1 に実用化されている代表的なモダリティと種々の情報をまとめた表を示す。実用化には至っていないが、これら以外にも様々な身体的・行動的特徴が認証に使用する特徴として研究されている。

表 1-1 実用化されている生体認証技術[25]

モダリティ	センサ	特徴量	認証時間	認証誤差	受容性	コスト	問題点
指紋	静電容量, 感圧式, 光学式センサ	画像データ, マニューシャ, スケルトン	5 秒以下	10^{-4}	中	安	異なる特徴量間の互換性, 指の乾燥, 水濡れ
顔	CCD カメラ	眼鼻口の位置, 髪の色, 顔色	5 秒以下	5~10% 程度	高	中	化粧, 眼鏡, 照明, 加齢, 双生児
虹彩	CCD カメラ	アイリスコード	5 秒以下	10^{-5}	中	高	まつ毛, 装置が大きい
静脈	近赤外線を利用する CCD カメラ	手のひら・指の静脈パターン	5 秒以下	10^{-5}	中	中	装置がやや大きい
掌形	CCD カメラ	指の長さ, 幅, 厚み, 4 本の指の表面積	1 秒以下	0.2%程度	中	中	装置が大きい
DNA	DNA アレイセンサー	塩基配列	3 時間	10^{-21}	低	高	コスト, 時間, 倫理
音声	マイクロホン	フォルマント	5 秒以下	2%程度	高	安	体調, 双生児, 継時変化
署名	タブレット	筆順, 筆圧, 筆速など	5 秒以下	2%程度	高	安	筋肉疲労, 継時変化

1.3 バイオメトリクス認証システム

本節ではバイオメトリクス認証における一般的な認証のフローと性能評価の方法について説明する。

1.3.1 バイオメトリクス認証システムの処理フロー

バイオメトリクス認証の一般的な処理フローを図 1-2 に示す。バイオメトリクス認証は大きく分けると 2 つのフェーズから構成される。

1 つ目のプロセスは、「登録」のプロセスである。まず、認証システムが保護している物を使用する権利を保有しているユーザのモダリティを計測する。次に測定したデータ（画像・信号など）から特徴量を抽出するアルゴリズムに従って、そのユーザを示す特徴量を取得し、テンプレートとしてシステムに登録する。

2 つ目のプロセスは、「認証」のプロセスである。ある人物から、保護している物の使用するための認証要求があった場合、テンプレート登録と同じ手順で、その人物のモダリティを計測し、入力データとする。入力データより特徴量を抽出し、テンプレートとの間で距離を計算する。この距離が、あらかじめ設定した閾値以下であれば、テンプレートと同じ人物であるとして認証を受け入れ、閾値より大きければ異なる人物であるとして、認証を拒否する。以下に各部の処理内容を解説する。

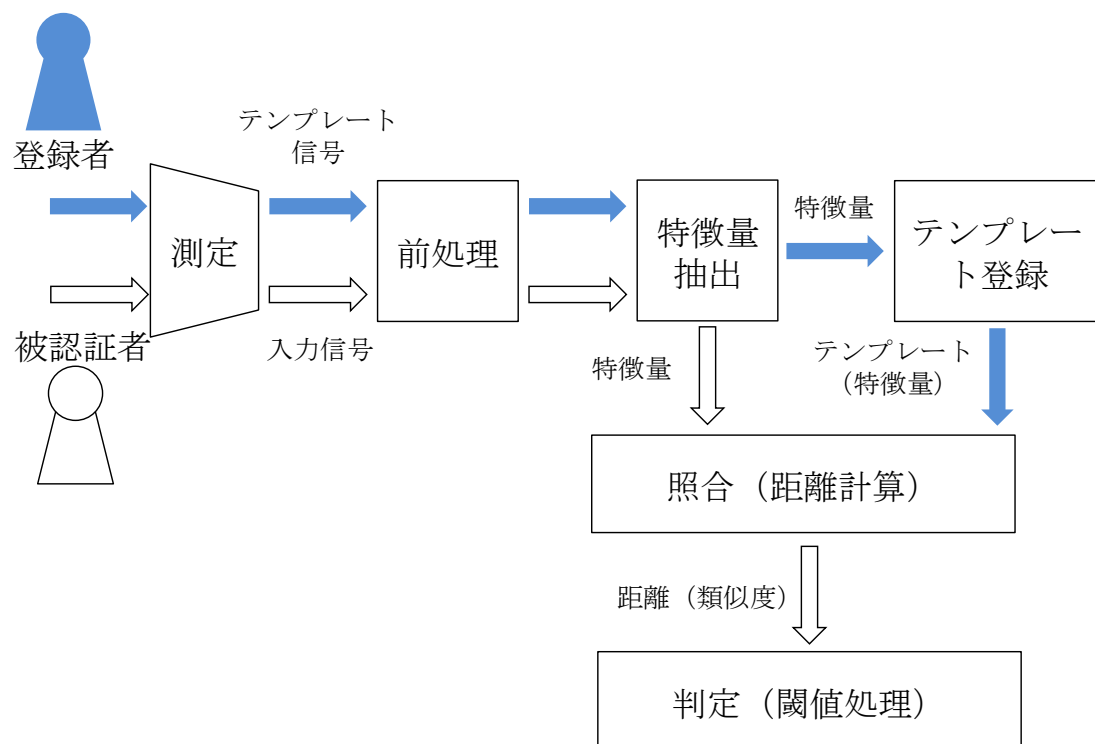


図 1-2 一般的なバイオメトリクス認証の処理フロー

(1)測定

生体認証は，認証を行う人物の身体の一部または行動を，何らかのセンサを用いて計測し，数値化することから始まる．モダリティや認証方法により，計測されるデータの種別は異なる．信号や画像，時には動画であったりする場合も存在する．また，同じモダリティにおいても計測するセンサは複数の方式が存在する場合もあり，一例として指紋は光学式のセンサだけでなく，指紋の凹凸による静電容量の変化を測定する方式や，センサに接触した際の熱を感知して指紋を計測する方式などが存在する．

(2)前処理

・ノイズの除去処理（平滑化）

各被験者から測定された信号は，本来の信号にノイズが加わった状態で計測される．本計測においても，加速度を電気信号に変換して計測されるため，電磁ノイズや，衣服の振動によるノイズなどが考えられる．一般的に信号成分は低周波数領域，ノイズ成分は高周波数領域に分布することが多いので，ローパスフィルタが用いられる．単純なものとしては，計測された N 個の振幅値を基に移動平均フィルタが使用される．

$$y(i) = b_0x(i) + b_1x(i-1) + b_2x(i-2) + \dots + b_Nx(i-N) \quad (1.1)$$

測定された時刻*i*における振幅を $x(i), x(i-1) \dots$ とし、フィルタ適用後の振幅を $y(i)$ とする。
 $b_0 = b_1 = \dots = b_N = 1$ とし、各時刻の信号を足し合わせた単純移動平均フィルタや、それぞれの係数に異なる値を設定する重みつき移動平均フィルタが存在する。

・正規化

認証に使用する信号は同じ値の大きさと取得できるとは限らない。例えば顔画像による認証を行う場合、認証を受けるユーザとカメラとの距離が異なると、画像中の顔の大きさも変化してしまい、そのままでは照合の際の誤認証の要因となる。この問題に対応するため、顔画像認証では目や口など他の部分とのコントラストが大きい部分が重なるように、画像の拡大や縮小、回転などの処理を施す。

(3)特徴量抽出

認証に使用する特徴の選定は、認証システム構築の上で非常に重要な要素である。他人との間で類似性が高い特徴を選択した場合、その認証精度は低いものとなる。特徴量抽出を行うか否かは認証手法により異なり、以下の様に大別できる。

- ・特徴抽出なし：計測した画像や時系列信号そのものを特徴とする
- ・特徴抽出あり：何らかのアルゴリズムを用いて測定データから、情報を抽出する

例えば、指紋認証では撮影した画像そのものを照合する手法[27]も存在するが、周波数解析を行う方法[28]、「マニューシャ」と呼ばれる指紋の線の特徴（指紋の線の端点や分岐点）を画像データから抽出し、認証に用いる方法[29][30]などが存在する。

このプロセスにおいて重要な事柄として、測定条件は一定とは限らないため、それらの変動に対しても強い特徴を抽出できる必要がある。特徴抽出の手法については、測定の対象となるモダリティにより様々な手法が適用されており、定型化した方法は存在していない。画像を用いた認証である指の静脈認証では、マニューシャ[31]や、大きさの変動に頑強な SIFT[32]を特徴量として用いた認証法が存在する。信号による認証については、オンライ

ン署名認証では計測された、ペンの座標や筆圧、ペンの傾きなどの信号そのものを特徴とし、DTW(Dynamic Time Warping)[33][34]によりマッチングする手法[35][36]が行われている。一方、話者認識では音声信号そのものを照合する方式よりも、人間の声道の特性を表す周波数スペクトルの包絡成分である LPC ケプストラムやメルケプストラム係数を特徴量とする方式[37][38]が一般的に採用されている。

(4)テンプレートの登録

個人認証においては、認証を求める人物（被認証者）は、正当に認証されるべき人物であるとして信号を認証システムへ入力する。システムは、その信号が認証して良い人物であるのか、それとも、その人物のふりをした詐称者であるのかを判断する。したがって、入力信号と比較するために、事前に本人の信号をシステムへ登録する必要がある。この際、測定される本人信号は測定の際に様々な要因による影響を受けて、一定の信号とならない場合が存在する。複数回の測定を試みて、その中から、認証精度の高い特徴をテンプレートとして採用したり[39]、複数の信号の平均値を計算することで平均テンプレートを作成したり[40]、主成分分析による固有ベクトルを求めて登録する手法[41]も存在する。

(5)照合（距離計算）

システムへの認証を求める被認証者の特徴と、事前登録されたテンプレートとの距離を計算し、その近さによって認証が行われる。ここで言う距離とは 2 つの特徴量がどれだけ異なっているかを示す尺度の事であり、相違度とも呼ばれる。似ている度合いを計算する場合もあり、類似度と呼ばれる。

対応する N 個の特徴量がテンプレートデータと入力データからそれぞれ抽出した場合、それぞれを N 次元の空間上の点として扱うことができる。この 2 点の距離を尺度としてテンプレートデータと同一人物であるかを判定する。この距離は、例えばユークリッド距離などを用いて計算することができる。一般的に距離を示す値が小さければ、類似している特徴を持っているため、テンプレートと同一人物であると判定し、距離が大きい値であれば、異なる特徴を持っているとし、異なる人物であると判定できる。また、ニューラルネットワークやサポートベクターマシンに代表される機械学習を導入することで特徴空間上の 2 つのクラスの識別境界を決定し、境界からの距離を基に照合をする手法も存在する。

(6)判定（閾値処理）

計算された2つの特徴量間の距離または類似度に対して閾値 D_{th} を設定し、被認証者が認証されるべき「本人（*Genuine*）」であるか、不正に認証を受けようとする「なりすまし者（*Imposter*）」であるかを判定する。計算された距離 D と閾値の値を比較することで判定することができる。計算されたのが距離（相違度）である場合は、以下のように判定する。

$$\begin{cases} \text{Genuine} & \text{if } D \leq D_{th} \\ \text{Imposter} & \text{if } D > D_{th} \end{cases} \quad (1.2)$$

D_{th} を小さくすることによって、距離が小さい場合のみ本人であると判定できるようになる。したがって、なりすまし者を排除できることになる。しかし、測定の際には様々な影響により、測定される信号に変動が生じる。信号の変動に対して追従する特徴を認証に用いる場合は、被認証者が本人であっても距離が大きくなり、なりすまし者と判定され、認証を拒否される割合が高まる。

類似度を判定に用いる場合は、得られた類似度 S の値が大きい程、類似性が高いと判断される。したがって、以下の式のように判断する。

$$\begin{cases} \text{Genuine} & \text{if } S \geq D_{th} \\ \text{Imposter} & \text{if } S < D_{th} \end{cases} \quad (1.3)$$

1.3.2 バイオメトリクス認証システムの性能評価方法

(1) EER による評価

バイオメトリクス認証システムは、一般的な指標として、等価エラー率（EER）により評価される。図 1-3 の横軸は信号間距離であり、縦軸はその信号間距離を認証のための閾値とした場合に、誤った判断を行った割合である。

False Rejection Rate（以下、FRR）は入力信号が本人のものであるにもかかわらず、他人であるとして拒否する割合を計算した値となる。各閾値において、以下の式により計算することができる。

$$FRR = \frac{\text{本人ではないと誤って拒否された回数}}{\text{本人による認証回数}} \quad (1.4)$$

閾値が小さくなるにつれ、認証を行う入力信号が本人のものであっても、誤って拒否される割合が大きくなることがグラフから分かる。

False Acceptance Rate（以下、FAR）は入力信号が他人であるにもかかわらず、誤って本人であるとして認証を受け入れてしまう割合を計算した値となる。各閾値において、以下の式により計算することができる。

$$FAR = \frac{\text{本人であると誤って受け入れた回数}}{\text{他人による認証回数}} \quad (1.5)$$

閾値が大きくなるにつれ、認証を行う入力信号が他人のものであっても、誤って受け入れる割合が大きくなることがグラフから分かる。この FRR と FAR が等しい時の割合が EER であり、グラフにおける 2 つの曲線の交点が EER となる。EER の値が小さいほど、その認証法が高い個人認証性能を有することを示している。グラフからも明らかなように、2 つのエラー率は閾値によって様々変化する。したがって、複数の認証方式の性能を比較するためには、複数のシステムで統一した指標が必要となる。この指標として用いるのが EER となる。各システムにおいて共通の基準により求められるので、性能を比較することが可能となる。

このグラフから閾値とそれに対応する FRR 及び FAR の値を検証することができる。認証システムは、その用途によりセキュリティレベルを変化させることが必要となる。例えば、銀行の ATM など、重要な資産や物品を管理する目的で使用する認証システムにおいては、重要な資産を詐称者に不正に取得されないように、FRR の精度を良くする（FRR の値を小さくする）よりも、FAR の精度を良くする（FAR の値を小さくする）ことの方が重要である。一方、個人的に使用する物（例えば、本研究で対象とするスマートフォンなど）の認証システムは、ある程度悪い（値が大きい）FAR を許容しつつ、FRR の精度を高く保つ（FRR の値を小さくする）方がユーザにとって利便性を高くなる。閾値によりシステムの認証性能を制御することで、同じ認証システムを適用した場合であっても、その要求に応じて柔軟に対応することが可能となる。

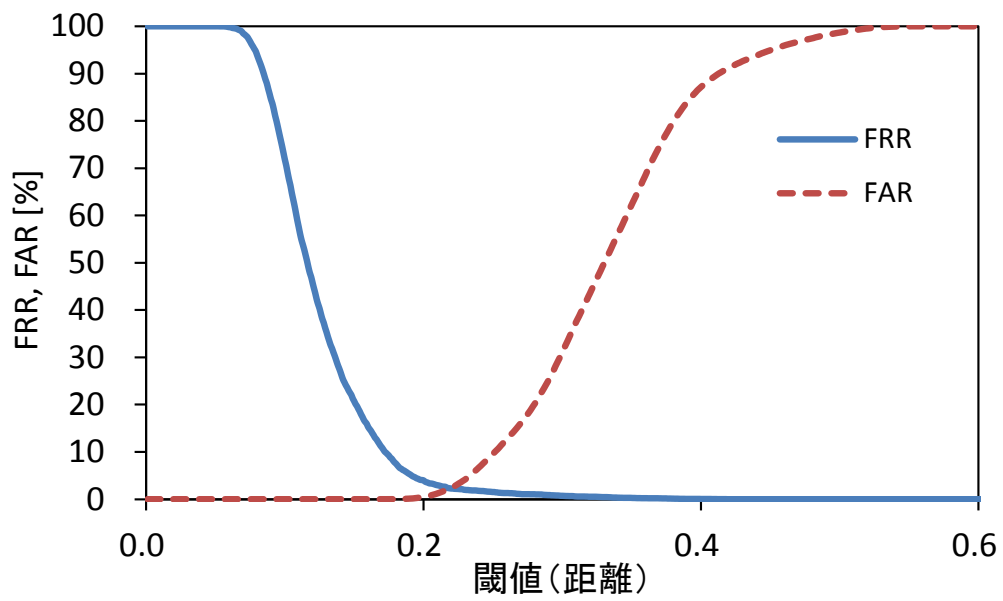


図 1-3 FRR と FAR の例

(2) ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線による評価

図 1-3 における FRR の各値と、それに対応する FAR をグラフにプロットすることにより図 1-4 に例を示す ROC 曲線が得られる。FRR と FAR の両方の値が 0 になれば、誤認証が全く発生しない理想的な性能を持った認証システムと言えるが、実際はどちらかが 0 にならず、トレードオフ関係を示す。しかしながら、認証システムの性能が優れているほど、その曲線は原点に近づく事から、曲線のプロットされる位置を観察することで、各々の認証システムの性能を評価することが可能となる。また、ROC 曲線からは EER だけでは評価できない、システム全体の認証精度を示す FRR-FAR 間の変化も観察することができる。

図 1-4 には 2 つの線が描画されており、それぞれ異なるシステムの ROC 曲線を示している。実線で示された ROC 曲線を描画する認証システム A よりも、破線で示された ROC 曲線を描画する認証システム B の方が、描画される曲線は全体的に原点側に描画されている。つまり、FRR をある値に固定して比較を行った場合、B の方が低い FAR を示すことが分かる。したがって、認証システム B の方が高い認証性能を有していると評価できる。

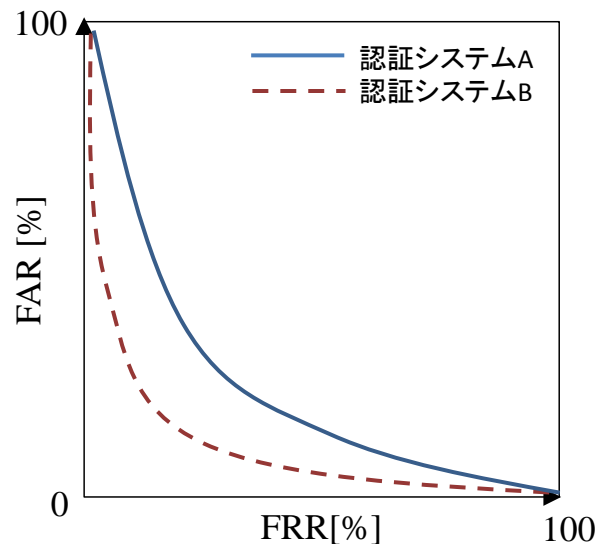


図 1-4 ROC 曲線

1.3.3 マルチバイオメトリクス

近年，単一の認証システムでは得られない高い認証性能を達成するために，複数の情報を基に認証を行うことで認証精度の向上を目指す「マルチバイオメトリクス」と呼ばれる手法が盛んに行われている．マルチバイオメトリクスは，その手法の違いにより，以下の様に分類されている[42][50]．

認証に使用する情報の種類による分類

(1)マルチセンサ

同一の部位の情報を複数のセンサで計測し，複数の情報による識別結果を基に認証する方法．

(2)マルチアルゴリズム

1つの生体情報を複数の識別器・アルゴリズムなどで判定し，その識別結果を基に認証する方法．

(3)マルチサンプル

同一部位から複数回データを収集し，それぞれに対する識別結果を基に認証する方法．

(4)マルチインスタンス

同種の身体的特徴（例えば，各指の指紋など）をそれぞれ収集し，各々の情報を基に認証する方法．

(5)マルチモーダル

異なる身体部位から収集した情報を基に認証する方法．

これらの認証方法について，(1)，(2)，(3)については同一部位の情報をもとに判定を行うため，認証精度の向上は大きくないと考えられている．そのため，特に(5)の方式による認証方法が盛んに研究されている．指と顔による認証[43]，指紋と静脈による認証[44]，唇と声[45]，署名と指紋[46]，顔と虹彩[47]など，様々な組み合わせが存在する．また，歩行動作を対象としたものでは，歩容・顔・身長を基にした認証[48]などが存在する．

認証処理の各段階によるマルチバイオメトリクス手法の分類[49][50]

複数の認証方法を合わせる手法はバイオメトリクスの分野では **Fusion** と呼ばれ、認証の様々な段階において、その手法が提案されている。主な **Fusion** 手法を説明する。

(1) 照合前

(1-1) センサーレベル Fusion

センサで計測した各々のデータから特徴を抽出する前に、それらを合わせることで、新たなデータを作成する手法のことである。例えば、複数回撮影した部分ごとの指紋画像を基に 1 つの指紋画像を作成する操作などが、この手法に該当する。

(1-2) 特徴レベル Fusion

複数の特徴を合わせて 1 つの特徴を作成する手法のことである。例として同一人物の同一モダリティから新たな登録信号を得た際に、テンプレートとなる特徴ベクトルの更新や改善をすること、同一人物の異なるモダリティから得た特徴ベクトルを一つの特徴ベクトルとすることなどが、特徴レベルの **Fusion** に該当する。異種モダリティから得た特徴を一つの特徴ベクトルに統合する場合、各特徴量のスケールが異なる場合が多い。このため、各特徴に対して何らかの正規化処理が必要となる。

(2) 照合後

(2-1) スコアレベル Fusion（統計的手法）

モダリティから得た特徴空間ではなく、スコア（類似度、相違度）を基に認証を行う手法である。パラメトリックなスコアレベル **Fusion** として、ベイズの定理を基に認証を行う手法が提案されている。各認証システムスコアの分布を推測し、尤度 $p(s_i|\omega_k)$ が最大値となるクラスであると判定する手法である。以下の 2 つの識別規則が知られている。

• **Product Rule**[51]

$$\text{識別結果} = \arg \max_{\omega_k} \prod_{i=1}^N p(s_i|\omega_k) \quad (1.6)$$

• **Sum Rule**[52]

$$\text{識別結果} = \arg \max_{\omega_k} \sum_{i=1}^N p(s_i|\omega_k) \quad (1.7)$$

ここで、 ω_k を所属するクラス、 s_i を各認証システムより得られたスコアとする。しかし、尤度を求めるためには、事前確率と確率密度関数の推定を正しく行う必要があり、その人物のデータを数多く必要とすることが認証においては課題となる。

(2-2) スコアレベル Fusion (識別的手法)

各認証システムから得られる類似度・相違度を特徴ベクトルとし、同一人物のものであるか、異なる人物のものであるかという 2 クラスの識別問題とする方法である。機械学習を用いて、事前に登録された学習データから識別関数のパラメータを決定する。結果は、識別境界からの距離となる。k 最近傍法や決定木[53]、サポートベクターマシン[54]など様々なものが提案されている。またパラメトリックな識別的手法としては、線形ロジスティック回帰[53][55]による手法が提案されている。

(2-3) 決定レベル Fusion

2 個の認証システムを基に認証する場合は、それぞれのシステムの認証結果の論理積を取る。これにより、どちらの認証システムの認証結果も受け入れと判定されなければ、最終的な認証結果が受理とならないため、誤って他人を受け入れる割合を減少させることができる。同時に、誤って本人を拒否する割合も高くなる。論理和を基に最終的には判断を行う場合は、逆の現象が発生する。

3 個以上の認証システムを合わせる場合は、同様に論理和や論理積を取る方法と、多数決を取る方法が提案されている。

1.4 本研究の問題設定

1.4.1 本研究で採用する認証方式

本研究でテーマとして扱う歩行認証は、スマートフォンを所持している人物が所有者であるか否かを判定する。

スマートフォンは通常、一人の人物のみが所有して使用し、複数の人物で共有することは少ない。つまり、端末所有者の歩行動作信号を認証すべき人物の情報として登録すれば良い。誰のテンプレート信号を選び出すかという問題は存在しない。

また、端末は歩行信号を測定するためのセンサ端末としてのみ動作し、リモートのサーバにおいて認証する方式においても、端末の識別情報などを ID として使用することで、サーバ上の DB から ID に結び付いた端末所有者のテンプレート信号を選出することが可能である。したがって、スマートフォンの認証を対象とした本研究では、複数の人物から誰であるかを判定する問題は存在せず、端末所有者であるかを判定する検証を行うことで十分であると考ええる。本研究では 1 対 1 の認証を行う「検証」の精度を向上させるための問題を検討テーマとして扱う。

1.4.2 歩行認証のプロセスと技術的課題

歩行認証における本人認証は、図 1-2 の一般的な認証のフローに当てはめると以下のプロセスから構成される。

(1) 測定

認証に使用する歩行動作信号をスマートフォンで測定する。

(2) 前処理

ノイズ除去のための信号の平滑化処理や、歩行速度の変化により変化した振幅や周期などの正規化すること。更に連続した歩行信号から認証に使用する部分信号を取得する処理も必要となる。

(3) 特徴量の抽出

歩行信号から高精度に認証できる特徴量を抽出する。

(4) 照合

あらかじめ登録されていた本人の歩行信号の情報（テンプレート信号，または特徴量）と，入力された歩行信号から得た情報との距離計算を行う．

(5) 閾値処理

照合によって得られた特徴間の距離に対して，閾値を適用して認証要求を受理するか，拒否するかを決定する．

はじめに歩行動作が開始されたことを検出し，連続的に計測される歩行信号から，認証に使用する部分信号を抽出する必要がある．歩行動作は左右両足を振る動作の繰り返しであり，図 1-5 に示すとおり，類似性の高い信号が繰り返し観測される．しかしながら，周期や振幅が全く同一とならないことから，テンプレートと入力信号において対応する動作区間の信号を正しく抽出出来なければ，認証精度の低下を招く恐れがある．周期や振幅が同一することから，その変化に追従する信号の抽出方法が必要となる．

また，センサは常に同じ位置に装着されるとは限らない．本研究では利便性を考え，特別な装着具を使用せず，特定のポケットに所持した端末を基にした認証法を検討する．端末を使用した後にポケットに端末を入れ直したり，ポケットの弱い端末への拘束力から歩行動作中に端末位置がポケット内で移動したりする可能性もある．したがって端末の位置の「ずれ」による計測位置の変化や，端末を入れ直した際に向きが変わることによる信号への影響を検討し，対応する必要がある．

さらに，同一人物であっても全く同じ歩行動作を行うことは困難である．したがって，照合においても 1 周期の時間の変化に対応する必要や，歩行速度の変化による振幅の変化に対応する必要もある．なお，端末を収納する場所（左右どちらのズボンポケットであるか）については，ユーザが意識すれば固定することは可能であるため，本研究の対象としない．特徴抽出については，認証性能が大きく変化する．非常に重要な問題と位置づけられる．

最後にテンプレート信号と入力信号（または各々から抽出した特徴量）を照合し，距離（または類似度）を求め，閾値処理により認証の受理または拒否を決定する．

これらを総括すると、歩行認証において認証の高精度化のために解決が必要な技術的問題としては以下が存在する。

- 端末のポケット収納の際の向きの違いに起因する計測信号の変化への対応
- 計測位置の変化に起因する計測信号の変化への対応
- 歩行速度の変化に起因する計測信号の歩行周期と振幅の変化への対応
- 歩行動作の変化に起因する計測信号の歩行周期と振幅の変化への対応

このうち、端末のポケット収納の際の向きについては、端末とポケットのサイズの関係から、上下と表裏が逆になるだけであると考えられる。これにより生じるのは理想的には、符号が変化するだけである。対策としては、静止時の重力加速度や平均加速度を測定することで、現在の端末の上下の向きについては判断できる可能性が存在すること。さらにセンサやその軸に応じて計測信号の符号を入れ替えることで対応できると予想されることから、本研究では今後の課題として取り扱う。

本研究では向きの違いを除いた、歩行動作や速度の変化に起因する周期の変化、振幅の変化、計測位置の変化への対応を行い、歩行認証の高精度化を実現する。

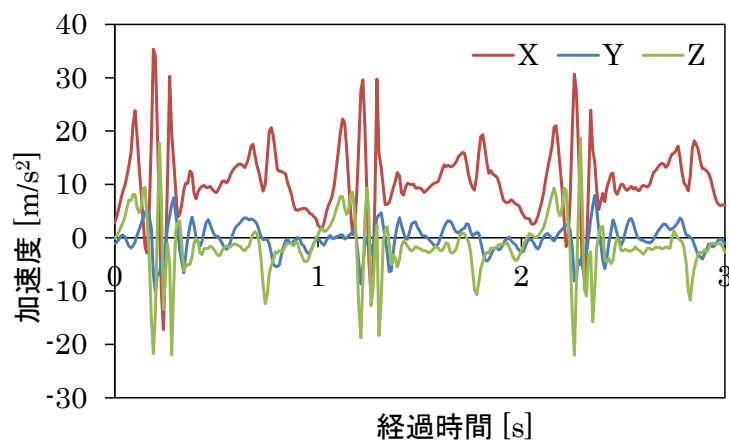


図 1-5 ポケットに収納した加速度センサで観測された歩行動作時の加速度信号
(X : 鉛直下向き, Y : 側方, Z : 後方)

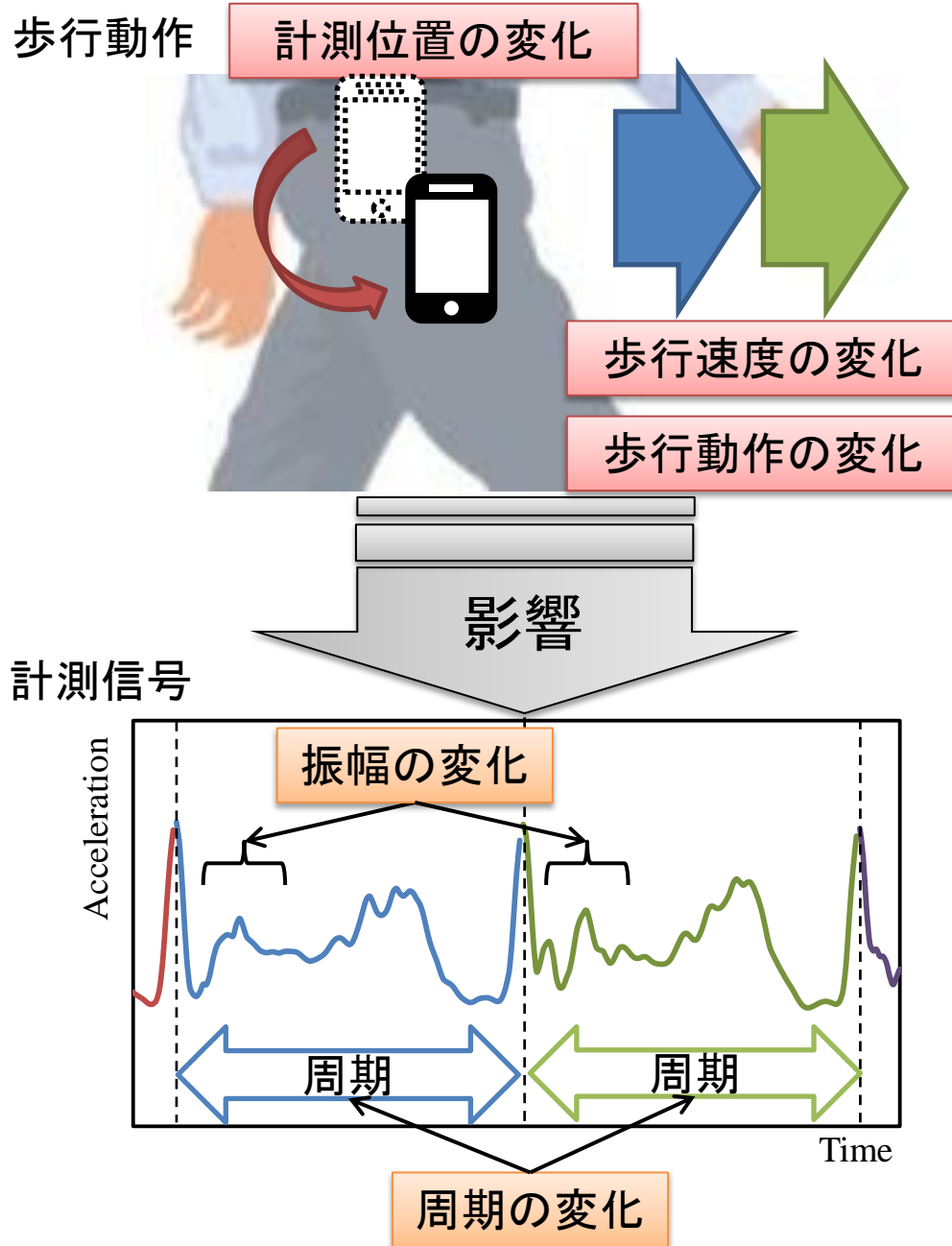


図 1-6 歩行認証において対応が必要な技術的課題

1.5 研究目的と本論文の構成

本研究の目的は、スマートフォンを始めとした小型端末のユーザ認証において、これまで問題となっていたユーザにとって負担の大きかった個人認証にかわる、新たな個人認証法を確立することである。したがって最終的な目標は

- ・ユーザが利用に負担を感じない、高精度な認証法を確立すること

となる。ユーザが認証に負担を感じる大きな要因として、これまでの個人認証法は何らかの認証操作が必要ながことが主要な要因となっていた。この問題に対応するため、認証操作として意識しない動作を基に個人認証を行うことで解決を目指す。本研究では、認証の対象とする動作として「歩行動作」に着目し、歩行動作を用いた認証法の確立を試みる。歩行認証を新たな認証法として確立するためには、以下の2点を実現する必要がある。

- (1) 個人認証法として信頼のおくことができる高い認証精度の実現
- (2) 日常生活での利用に不便さや煩雑さを感じない利用法の実現

(1)については個人認証法としては当然のことと言えるが、指紋や虹彩などその人物特有の身体的な特徴ではなく、行動的な特徴を基に個人を識別する方式においては、同一人物の同一の行動であっても、全く同じ動作をすることは困難であり、認証精度が低くなる傾向が存在する。更に歩行認証は研究途上であり、音声や署名認証と比較しても従来研究の認証精度は低い結果を示していた。

(2)については、本研究はスマートフォンでの認証実現を主要な対象とする研究である。ユーザの利便性を考えないならば、身体に多数のセンサを装着したり、スマートフォンでは利用されない特殊なセンサを利用したりすることも可能である。極端な例を挙げるならば、指紋センサを常に指に装着させ、何らかの方法でスマートフォンに計測結果を送り続けるのならば、高精度な認証を実現することは可能である。しかしながら、それでは日常生活での利用における利便性は著しく損なわれてしまう。本研究で歩行動作を認証の特徴として利用する目的は、認証に関わる不便さ・煩わしさを取り除くことである。通常行わない方法でセンサを身に着けたが為に、本人の特徴を計測すること自体にユーザが煩わし

さを感じてしまうならば、研究を行う意義が失われる。本論文では日常生活の利用でユーザが煩わしさを感じない所持方法を採用し、端末を身に付けて歩行しているだけで認証することを検討する。本論文の構成は、これを以下の構成で論じる。

第2章では本研究の対象である歩行認証の関連研究について調査結果を示す。はじめに、1次元信号を用いて識別を行う代表的な研究として音声認識の一般的な手法を解説する。本研究も同じ1次元信号を基に識別を行う問題であり、これを基に音声認識で採用される基本的な処理の枠組みを採用する。次に、歩行認証の従来研究の手法について解説し、従来研究が抱える課題について分析する。

第3章では、本研究の提案手法を解説する。第2章で明らかになった課題を解決するための提案手法を述べる。それら提案手法を加えた本研究で採用する認証システムの全体像について解説する。

第4章では提案手法について2種の評価実験を行う。1つ目は50人の被験者から収集したデータセットを使用する。センサをポケットではなく、大腿部ズボンポケット上に専用のベルトを使用して固定し、計測を行った。2つ目は17人の被験者から収集した、より実際の使用に近づけたデータセットを使用して評価を行う。各被験者について4回の計測を行い、計測のたびにセンサをポケットから取り出す操作を行う。認証の際に照合するテンプレートと、入力信号についても異なる計測回のデータを使用する。従来研究の手法と比較して、本研究の提案手法は高い認証精度を実現できることを示す。

第5章では、本研究の各章で得られた成果についてまとめ、今後の課題と展望についてまとめる。

第 2 章 関連研究

歩行認証は，歩行動作により生成される「信号」を基に認証を行う．本章では，はじめに 1 次元信号を用いた代表的な認識の研究分野である音声認識のアプローチについて解説し，1 次元信号を用いた認証に必要な各種処理を明らかにする．次に，歩行動作を基にした本人認証法に関する様々な研究について解説し，歩行動作を行動的特徴量とし，個人を識別できる可能性について述べる．最後に本研究のテーマであるウェアラブルセンサを用いた歩行認証について従来研究の解説を行い，従来研究が抱える問題点を明らかにする。

2.1 音声の認識

2.1.1 音声の認識手法

音声認識とは音声信号が示す意味をコンピュータにより判定することである．大まかな処理の流れを図 2-1 に示す．

音声認識において認識に用いるデータの基本単位は，大きく 2 つに分類することができる．一つは句や単語といった複数の音が連結して構成される音声を基本単位として認識に用いる方法である．もう一つはそれより小さな音素や音節などを基本単位として用いる手法である．単語単位での認識を行うことにより，単語内での音同士の結合による音の変化（調音結合）の問題を回避できるため，単語認識の問題においては有利に作用する．しかしながら，連続音声認識では，単語同士の接続においても調音結合の問題が発生する．単語の組み合わせは文章において膨大であるため，この問題に対応できるテンプレートを全て用意することは非現実的な問題となる．この理由から大語彙を認識するシステムでは，音素を単位とした音声認識手法が採用される．音素を単位とする場合は，調音結合の問題点に対処するために，認識の対象としている音素を前後の音素との関係から判定を行うトライフォンの手法が採用されている．これにより，調音結合の問題に対しても高い精度で認識を行うことが可能となる．以下に，音声認識における手法をステップごとに分けて，その処理内容を解説する．

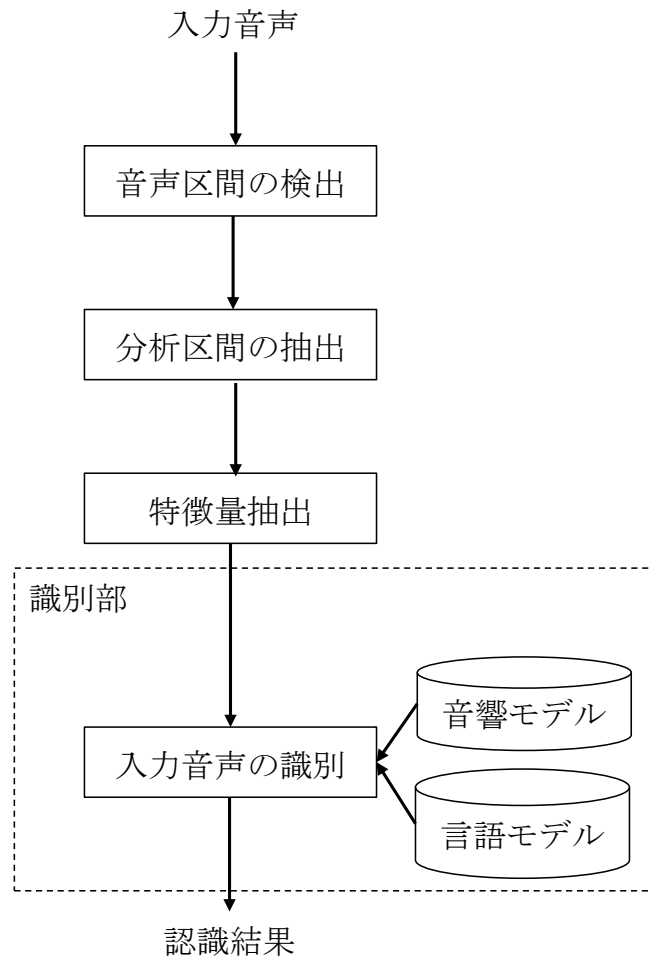


図 2-1 音声認識の処理フロー

手順 1：音声区間の検出

システムへ音声が入力されているか判定する処理を行う。様々な手法が提案されており、振幅に基づく手法としては振幅の大きさや音声信号の振幅が 0 と交差する回数などの手法が存在する。このような手法は雑音下では発生区間を誤検出する可能性が存在するため、より雑音に対して頑強な音響モデルに基づき、音声信号であるか雑音であるかを判定して検出する手法も存在する。

手順 2：分析区間の抽出[56]

文章を構成する連続的に発生される音から発生した内容を理解するためには、まず初めにシステムが文章を認識できる基本単位に切り分ける必要がある。この処理は「セグメンテーション」とも呼ばれる。以下に音素単位、単語単位を基本単位とする音声信号の切り

分け方法を説明する。

- 音素を基本単位とする手法

音声信号において定常状態にあるとみなすことができる 20～30ms 程度の時間長の信号を切だし 1 つのフレームとする。フレームの切り出し開始位置を 10～20ms ずつ動かして、音声信号を構成する複数のフレームを得る。

- 句を基本単位とする手法

韻律情報（抑揚など文字に表れない情報）を基に境界を検出する手法である。韻律情報はピッチ（基本周波数）に表れることが知られており、ピッチの連続的な変化であるピッチパターンを特徴として照合し、最小距離となるピッチパターンモデルを最適なピッチパターンモデルとして決定する。最適なピッチモデル同士の接続する境界が句境界となる。句境界検出手法の概要を図 2-2 に示す。

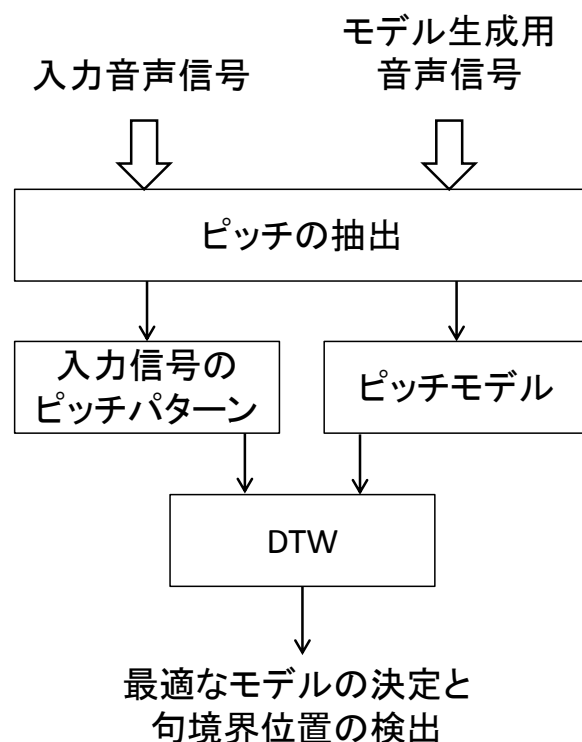


図 2-2 句境界検出の概要

連続した信号からピッチを抽出する方法としては、ラグ窓法[57]やケプストラム法などが存在する。本研究では提案手法と比較するために、音声認識手法を適用した場合の認証精度を検証する。セグメンテーションのためのピッチ検出方法として、ラグ窓法を採用する。

図 2-3 にラグ窓法の処理フローを示す。ラグ窓法は、はじめに、音声信号の一定サイズの各フレームのパワースペクトルを求め、パワースペクトルを逆変換して自己相関関数を求める。次に自己相関関数に対してラグ窓をかけて、再びフーリエ変換することで平滑化した信号のパワースペクトルを得る。この比を取ることで、ピッチ構造のみを分離することができる。これを逆変換することで、基本周波数の位置に大きなピークが観察され、振幅最大値を選択することで、そのフレームにおけるピッチを得ることができる。

図 2-4 に「雨」という音声波形をラグ窓法により抽出したピッチのパターンと、音響分析に用いられるオープンソースである Praat[58] により抽出したピッチパターンを比較したグラフを示す。Praat とラグ窓法のピッチパターンはほぼ一致しており、ラグ窓法は高い精度でピッチパターン抽出を実現できていることが分かる。本論文において、音声認識手法をそのまま適用して認証精度を評価する場合は、ラグ窓法を用いたピッチパターンにより、認証用信号への分離を行う。

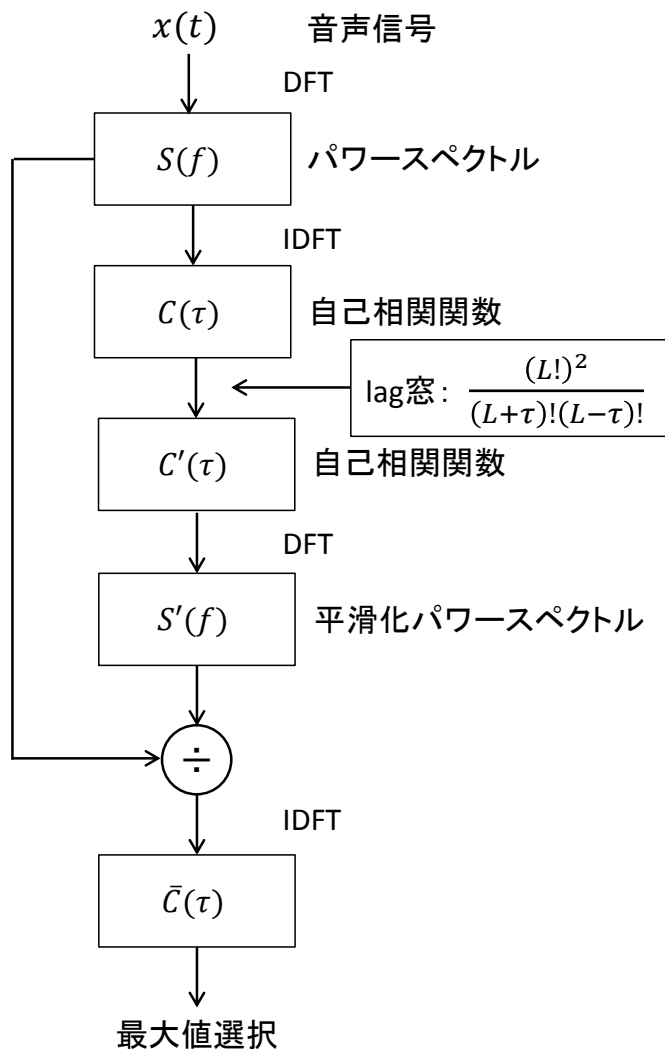


図 2-3 ラグ窓法の処理フロー

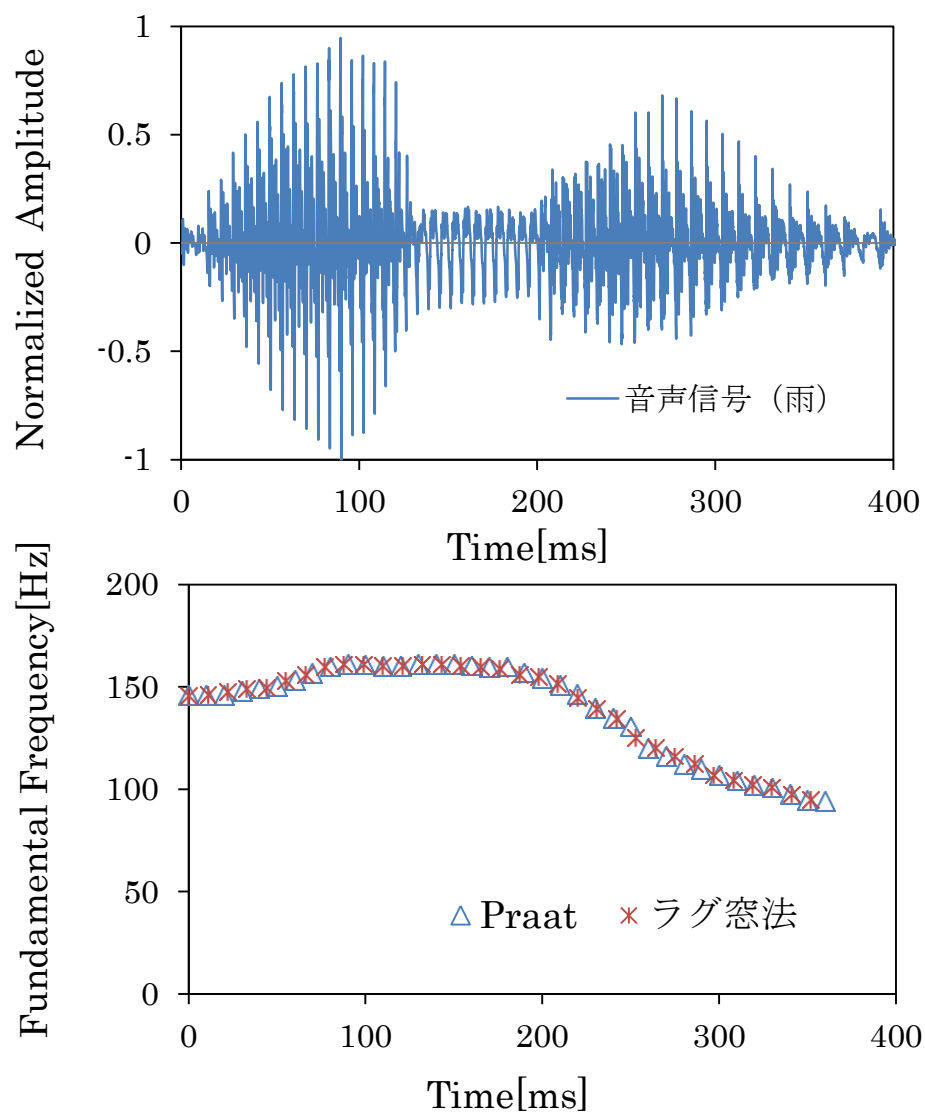


図 2-4 抽出された「雨」のピッチパターンの比較

手順 3 : 特徴量の抽出

音声認識では通常、周波数解析によるスペクトルを特徴量とする。この理由は、音声信号のサンプリング周波数は数 kHz～44.1kHz であり、抽出したフレームをそのまま特徴量とすることは、データ量が大きくなり過ぎる問題が存在する。また、波形を構成する位相情報は録音や伝送系により変化し易いこと、人間の音声の知覚には大きく影響をしないことが知られている。これらのことから、音声認識においては位相情報を取り除き、重要な振幅情報のみを比較するために、抽出したフレームに対してスペクトル解析を行うことが多くの研究でされている。抽出したフレームに対して短時間フーリエスペクトルや、人間の発声過程に則したスペクトル解析手法であるケプストラム解析、あるいは LPC ケプストラム、メルケプストラムなどが特徴量として採用されている。

手順 4 : 入力音声の識別

近年の研究では取得した各フレームの特徴量を基にどの単語であるかを認識するためには確率モデルに基づく手法である HMM (Hidden Markov Model, 隠れマルコフモデル) が採用されている。HMM の認識モデルは複数の状態が連結したものであると定義される。学習データを基に、各状態において種々の特徴ベクトルが出力される確率及び、次の状態へ移動する遷移確率を確率モデルとして決定する。未知のデータを認識する場合は、抽出された特徴ベクトルの系列を各単語の HMM へ入力し、入力された特徴ベクトル系列が出力される確率をそれぞれのモデルで求める。未知のデータは、その特徴ベクトル系列が出力される確率が最大となる HMM の単語であると識別される。

小語彙の単語認識では、このように HMM は構成されるが、大語彙の単語認識の場合は認識する単語の数だけ HMM を生成する問題が生じる。そこで、大語彙の音声認識システムでは、単語単位で HMM を作成するのではなく、音素単位で HMM を生成し、音素の識別を行う。この場合、得られた音素系列から単語を識別する処理は、単語辞書と比較することで行う。最後に単語と単語のつながりを考慮した確率モデルである言語モデルを用いることで、実際の文章を認識する。

これらで使用する確率モデルは 1 つのガウス関数ではなく、性別や年齢などを考慮して複数のガウス関数を組み合わせた確率モデルを構成する。この手法の問題点としては、確率モデルを構成するために十分な数の学習データが必要となり、適切な確率モデルを推定できなかった場合、良好な精度が得られない点が挙げられる。

まとめ

この項では音声認識の基本的な処理手法について解説した。1次元信号を基に認識する問題として盛んに研究が行われている分野が音声認識であり，歩行認証も加速度など1次元信号を基に人物の識別を行う類似の問題であると考えられる。したがって，語彙の認識を行う音声認識との関連は高く，基本的な処理の枠組みは適用することが可能と予測される。本研究においても基本的な処理の枠組みについては音声認識の手法を採用し，歩行認証に対応する手法を各処理の段階に加えることで，本研究の目的である歩行認証の実現を目指す。

2.2 歩行動作に基づく個人認証に関する研究

歩行動作に基づく個人認証は本研究で扱う歩行認証以外にも様々な手法が行われてきた。歩行動作に基づく認証について簡単に解説する。

- 歩容認証

歩行動作に着目した個人認証については、近年、様々な研究が行われている。最も盛んに研究が行われている認証法として「歩容認証」が存在する。歩容認証は、カメラで撮影された動画像から手の振りや体の動作などの行動的特徴を抽出し、個人の識別に利用するものである。服装が変化した場合[59]や、性別や年齢ごとに分けたグループの持つ特徴の違い[60]、歩行者との撮影するカメラの最適な配置方法[61]など多くの課題について研究がされている。また、近年ではマルチバイオメトリクスの手法が取り入れられ、歩容だけではなく、ビデオ画像から抽出した身長や顔に関する特徴を組み合わせることで認証精度の向上が試みられている[62][63][64]。

- 歩行時の足の裏の圧力に基づく認証

ビデオ画像に基づく認証以外にも、歩行動作から様々な信号を計測して認証を行う研究が存在する。その一つとして歩行時の足の裏の圧力により認証を試みる研究もおこなわれている。歩いた際の足の裏の圧力の変化をマット型の荷重分布センサ[65]やプレート状の足圧センサ[66]、中敷き型の足圧センサ[67]で計測し、左右の脚の圧力から個人の特徴を抽出して認証を行っている。

これらの研究結果は歩行動作に個人ごとの特徴があり、個人認証が実現可能な個人差が存在していることを示唆していると考えられる。特に歩容認証においては、約4000人と非常に多くの被験者に対して実施した研究についても良好な認証精度を示した研究が存在している。歩容認証はビデオカメラにより体全体の歩行の様子を撮影し、その動画像を基に認証を行う。したがって、歩行動作に伴う多くの体の部位の特徴を認証に利用可能となる。一方、本研究で扱うデータは携帯端末に搭載されたセンサで測定したものであり、センサは体の一ヶ所に装着することになるため測定可能な部位は歩容認証より少ない。しかし、直接、体にセンサを身に付けることが可能となるため、精度良く歩行動作によって生じる

信号を測定することが可能と考えられる．これにより，計測した信号から個人の違いを容易に抽出でき，高い精度で認証を実現できる可能性が存在すると考えられる．

2.3 歩行認証の従来研究

2.3.1 従来研究の認証手法

これまでも歩行認証を実現すべく，多くの研究が行われてきた．表 2-1 にウェアラブルセンサを用いた歩行認証既存研究の概要を示す．歩行認証システムの主な構成要素として，歩行動作信号の測定部，認証を行う歩行信号の抽出部，そして歩行信号の照合部から構成されている．信号の抽出と照合は密接に繋がっていて，特に後述する「信号そのものの類似性を基に行う認証法」では，同じ動作区間の信号を抽出できないと認証精度は著しく低下する傾向が存在する．これらの研究で行われた手法について簡単に述べる．

手順 1 : 歩行信号の測定

歩行認証においては歩行動作を身に着けた何らかのセンサを用いて測定する必要がある．従来の研究では加速度信号を測定することが殆どであり，角度に関する信号（角度・角速度）を計測して認証を行う研究は僅かに存在している．センサとしては，計測用のセンサを利用する以外に，スマートフォンに搭載されたセンサを使用して計測を実施している研究も存在する．

- 加速度

加速度センサを体の部位に固定し，歩行時に生じる加速度信号を測定する．歩行認証における従来研究では加速度センサが主要な測定センサとして使用されている．主なセンサ固定位置としては腰の背面中央や側面にベルトや専用の装着具を活用してセンサを固定する研究が殆どである．少数の研究では足首やズボン前ポケットなど，様々な位置にセンサを固定して研究がされている．

- 角度・角速度

少数だが研究では角度センサや角速度センサを基に歩行動作による個人認証を行う試みが報告されている．Soumik[68]らは関節 8 箇所角度センサを取り付け，

歩行時の関節の動作を計測した。寺田ら[69]は、足首のくるぶしに加速度センサと角速度センサを取り付けて認証を行った。角速度信号に被験者間の違いが存在したとし、角速度信号を用いた認証結果を報告している。

また、歩行認証の研究の多くは 1 個のセンサを体の部位に装着して歩行信号を計測している。部位としては腰の背面中央や側方が最も多い。複数のセンサを併用して認証を行った研究は少なく、体の関節 8 箇所（両肩・両肘・両股関節・両膝）に回転角センサを取り付けた前述の研究[68]や、体の部位 5 箇所（上腕・手首・骨盤・大腿部・足首）に加速度センサを取り付けた研究[70]が存在する。この 2 つの研究においては同種のセンサを複数用いて認証を行っている。

手順 2：前処理

測定歩行信号からの認証用部分信号の抽出

歩行信号は歩行動作に伴い発生する信号である。したがって、ユーザが歩行を停止するまでは継続的に測定される。このことから、例えば顔認識における画像の撮影などと異なり、何らかの手法を基に認証に使用する信号を分離・抽出する操作（セグメンテーション）の処理が必要となる。歩行認証で採用されているセグメンテーションの手法としては以下の 2 種に大別される。

- 固定サイズウィンドウを用いた手法

連続した信号に対して固定サイズのウィンドウを移動させることにより、ウィンドウ内の固定サイズの信号を連続歩行信号から切り出す手法である [71][72]。しかしながら、歩行動作によって生じる信号を 2 歩一周期であると見なした場合、同じ歩行動作を繰り返すことは困難であることから、その 1 周期の歩行動作ごとに周期は異なる。したがって、抽出された信号間で信号を生成する動作区間にずれが発生し、異なる信号波形の信号を抽出する可能性が存在する。入力信号とテンプレート信号そのものを照合する際は、このずれは認証精度を左右する決定的な問題となる。また、信号の一部だけ抽出される可能性も存在し、信号から特徴量を抽出して照合を行う認証法においても、正しく特徴量が抽出できない可能性も存在する。したがって、ウィンドウサイズを歩行周期の変化に合わせて伸縮するアルゴリズムを実装する必要がある。

また、このような問題を解決するために歩行周期（1 秒前後）の数倍の長さ（3 秒，5 秒，7.5 秒）の固定サイズのウィンドウを，ウィンドウサイズの半分だけ移動させながらセグメンテーションを行う研究[73]も存在する．しかしながら，この手法ではユーザは認証を行うために長期間（6 歩～15 歩程度）の歩行が必要となり，歩行認証の利便性が大きく損なわれる．

- 歩行信号の特徴を基に抽出する手法

計測した歩行信号の時間領域において，周期ごとの何らかの特徴を基に 1 周期の信号を抽出する方法である．研究により様々な手法が考案されているが，大まかにまとめると加速度信号の振幅の極値をセグメンテーションの位置として利用する[76][81]．単純に最大値や最小値をセグメンテーションの位置とする手法では，隣接の極値との大小関係が逆転する可能性があることから，正しくセグメンテーションが出来ないため，この問題を補正するアルゴリズムが必要となる．

手順 3：特徴量の抽出

入力された信号が本人のものであるか，本人に成りすました他人のものであるかを識別する．事前に登録された本人の特徴量と，入力された信号の特徴量を比較することで判定を行う．特徴量としては，信号そのものを特徴量として照合する場合と，信号から何らかの特徴量を抽出して照合する手法が存在する．以下に歩行認証で使用される代表的な特徴量を示す．

信号そのものを特徴量とする手法

- 振幅

信号そのものを特徴量とし，テンプレートと抽出された入力信号で対応する時間における振幅値を比較する．従来研究ではユークリッド距離やマンハッタン距離などに代表される 2 信号の距離に基づく研究[74][76]や，正規化相互相関係数に代表される類似性を計算し，照合に用いる研究が存在する[77] [74]．前述のとおり，テンプレート信号と入力信号の長さは異なる場合が殆どであり，そのままでは計算を行うことができない．そこで線形補間や DTW を使用して長さのことなる信号を整合する処理を適用し，距離計算が行われている．各振幅の出現する順番といった時間に関する情報を保持し

たまま照合を行うことができる。

信号から特徴量を抽出する手法

- 振幅

振幅値を用いるが、振幅の時系列信号全体を特徴とするのではなく、振幅を何らかの値に計算などを用いて集約し、特徴量とする手法である。最大値や最小値、平均、分散、二乗平均平方根、振幅値の符号の変化する回数などを特徴量として採用し、検証を行った研究が存在する[71][78][72][73]。振幅をヒストグラムに変換し、ヒストグラムの類似性や尖度、歪度を特徴量とする研究[79]も存在する。

- 周波数成分

FFT などの周波数解析によって得られた振幅スペクトルやパワースペクトルを本人判断の特徴量とする手法を採用した研究[77]が存在する。また、音声認識の分野で使用される LPC ケプストラムを特徴量とする研究[72]や人間の聴覚に基づく重み付けを行ったメルスケール、バークスケールケプストラム係数を利用し認証を行う研究[73]も存在する。これらの手法においては振幅情報を照合する手法となり、位相情報の照合は行われない。

一例として振幅の分散を特徴量とする場合、振幅は 1 つの値に集約され、各振幅値やその発生する順番は分散には含まれない。したがって振幅を特徴量とする場合においても、信号そのものを特徴量とする手法と比べると、時間的な情報が欠落すると表現できる。同様に他の手法においても、信号から特徴量を抽出する手法は何らかの情報が欠落する。これは、メリットでもデメリットにもなる。情報量の圧縮や不要な情報の削除という視点ではメリットと捉えることができ、高い認証性能を実現できたのならば、その人物固有の特徴を抽出した優れた手法と言える。しかしながら、認証精度の低下を招くならば、個人の特性を特徴量として完全に抽出できておらず、情報の欠落が認証精度の低下の原因となった可能性が考えられる。

歩行認証において得られた特徴量を基に識別する手法としては以下の手法が存在する。

- 距離または類似度に基づく手法

テンプレート信号と入力信号から得られた n 次元の特徴ベクトル間の距離を求め、閾値により認証を受理するか、拒否するかを判断する古典的な手法である。採用する距離計算法としてはユークリッド距離を採用する研究やマンハッタン距離を採用する研究が存在する。歩行動作認証の従来研究では、この手法を採用する研究が多い。

- 識別的手法

入力信号から得られた特徴量を特徴空間に配置し、本人のクラスに属するか否かを判定する手法である。識別境界は識別器を用いて決定される。加速度信号から得た特徴量に対して SVM を用いて識別境界を決定し、本人であるか否かを判定する研究[73]が存在する。

- 確率的手法

事前に登録された信号から得られた特徴量の確率分布に基づいて、入力信号から得られた特徴量がその人物である確率を求める手法である。その人物の特徴モデルを推定する必要がある。HMM を用いて認証を行う研究[73]が存在する。確率モデルに基づく手法は、正確な本人モデルの生成のために膨大なデータを必要とする。特に認証の場合は、初期に登録される本人データはそれほど多くなく、モデルの生成において問題が生じる可能性が存在する。

表 2-1 従来研究の認証手法と報告された EER[%]

従来研究	被験者数	センサ位置	センサ	EER	照合法 (最高精度を報告)
#1[77]	36	腰	加速度	7	A
#2[80]	22	腰	加速度	22	A
#3[74]	21	足首	加速度	5	C
#4[81]	50	ズボンポケット	加速度	7.3	A
#5[82]	48	腰	加速度	約 10.0 ^{a)}	C
#6[83]	21	腰	加速度	5.6	B
#7[75]	11	腰	加速度	3	C
#8[84]	51	右腰	加速度	20.1	B
#9[76]	60	左腰	加速度	5.7	B
#10[85]	35	腰	加速度	6.7	B
#11[79]	47	種々の部位 1 箇所	加速度	14	C
#12[73]	36	右腰	加速度	約 10 ^{a)}	C
#13[69]	9	足首	角速度	23.1	A
#14[70]	175	5 箇所	加速度	2.2	C
#15[68]	30	各関節 8 箇所	角度 (回転角)	0% ^{a)}	C

複数手法を報告している研究は最高精度を報告した手法についてのみを表に記載

照合法の分類記号の説明：

A：信号同士を照合する手法（信号の周期を正規化により線形に調整）

B：信号同士を照合する手法（信号の周期を DTW により非線形に調整）

C：信号から特徴量を抽出し、特徴量を基に照合する手法（例：周波数スペクトルなど）

※A と B は距離や類似度を基に認証

a)：認識率から推測

2.3.2 認証法の分類と考察

表 2-1 では従来研究における認証手法を以下の 3 種類に分類する。

- (1) 周期を線形に調整し，信号同士を照合する手法（線形補間など）
- (2) 周期を非線形に調整し，信号同士を照合する手法（DTW など）
- (3) 信号から抽出した特徴量を照合する手法（識別器，確率モデル，特徴空間の距離）

歩行認証の従来研究では，計測した 2 つの信号そのものを特徴量とし，距離を計算する手法が多く行われてきた．その一方で，測定信号からユーザ特有の特徴を抽出するための手法を提案し，認証する研究も行われている．これらの研究では振幅を基に計算された特徴である標準偏差や最大値，最小値，二乗平均平方根，FFT によるパワースペクトルとはじめとした周波数領域の特徴量，音声認識などに使用される LPC ケプストラム，メルケプストラムなど，振幅に関わる特徴量を基に認証を行うことが提案されてきたが，被験者数が多い場合に，高い認証精度を達成することができていなかった．

表 2-1 を基に従来研究の手法と認証精度を比較する．これらの研究においては各々データセットも異なり，単純な比較は困難であるが，体の複数部位にセンサを取り付けた研究を除外すると，被験者数が多い場合に信号そのもののマッチングを行う手法である DTW や正規化相互相関関数（照合法 $A \cdot B$ ）の方が，信号から何らかの特徴量を抽出する手法（照合法 C）より良好な EER を示す傾向が存在する．これらの結果から，歩行認証においては，振幅情報だけではなく，時間情報も重要であることが推測され，高精度な認証実現には信号自体を特徴量とする手法が有効であると考えられる．

次に DTW と正規化相互相関による類似度計算の際に採用される線形に周期を調整することにより照合を行う手法について従来研究の結果を検証する．図 2-5 に同一人物から取得した歩行信号を 2 歩 1 周期ごとにグラフ化したものを示す．信号からは類似性は高いが，振幅や周期は同一ではない準周期信号であることが観察される．歩行動作は両足を振る動作の組み合わせにより構成されており，各脚の動作は線形に変化していない場合が存在することも観察される．したがって，照合前に線形に信号を変化させて整合させる必要のある正規化相互相関では，正しい整合が出来ず，信号の認証精度の向上に十分に寄与できない可能性が考えられる．非線形な変化にも対応できない正規化相互相関を整合方法として積極的に選択する理由は無いと考えられる．

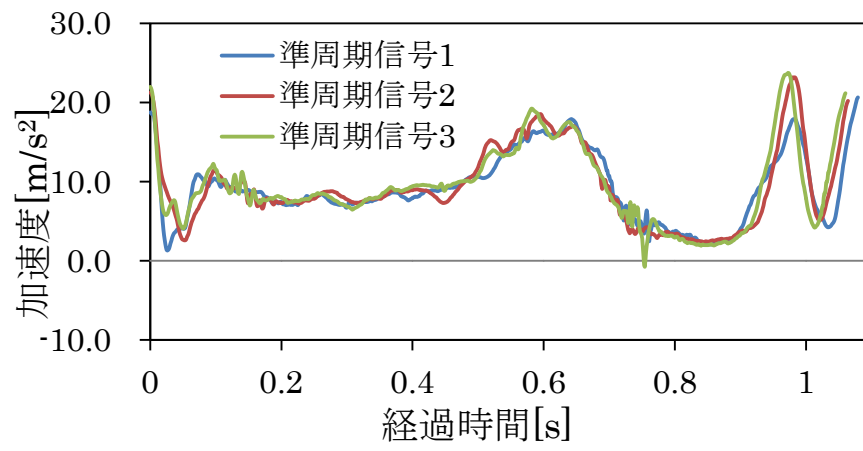


図 2-5 同一人物から取得した歩行加速度信号

2.4 歩行認証の問題点とその要因

本研究の最終的な目標は、歩行動作のみでユーザ負担の小さいかつ高精度な個人認証法を実現することである。歩行認証の従来研究における問題点を述べる。

問題点 1：ユーザ負担の大きな端末所持方法

表 2-1 に示す通り、歩行認証の研究は様々存在する。しかし、これらの研究については認証精度を高めるための歩行信号の照合方法について多く研究が行われてきたが、日常に受け入れやすいセンサの取り付け位置という観点は考慮されていないものが多い。従来研究での端末所持位置は大よそ以下の 4 種類に分類できる。

- ・ 腰
- ・ 足首
- ・ ズボン前ポケット
- ・ 複数の身体部位

従来研究の多くは、腰（背中側中央、または両側面）にセンサを取り付けて歩行動作を計測し、その信号を基に認証をしている。ところが、日常において腰に端末を固定することは少なく、例えばホルスター型スマートフォンケースのような特別な道具が必要となってしまう。この結果、歩行認証を実現するために道具が必要となってしまう、ユーザにとって煩わしい認証方法になる恐れがある。これは足首や、体の複数個所にセンサを装着した場合も同様の問題を抱える。

歩行認証が他の認証と比較した場合の大きな長所は、端末を所持さえしていれば、歩行中や歩行直後であれば認証操作が不要になるという利便性にある。ユーザ負担が大きいならば指紋認証など、従来から存在する精度の高い認証法を導入すれば良いだけであるため、歩行認証を実現する必要性は存在しない。ユーザに負担を感じさせないためには、「日常的に端末を所持する位置での認証法であること」や「端末以外に道具が不要であること」が必須の条件であると考えられる。したがって、上記所持位置では特別な道具や固定法なしで端末を所持できるズボンポケットがユーザへの負担が小さくユーザに受け入れ可能な端末所持位置であると考えられる。移動の際にズボンポケットに端末を所持することは、ユーザ

が意識をしたならば実現可能であり，大きな問題とはならないと考えられる．ポケットに保持したセンサでの研究は少なく，比較的多くの被験者数で行った研究として Gafurov らの研究[81]が存在し，最も高い精度を報告している．この研究の認証手法について簡単に述べる．

セグメンテーション

加速度振幅が閾値（1.3G）以上となる時間を検知し歩行が開始されたとする．その時間より前 50ms，後 150ms の時間の範囲内から加速度最小値となる時間を得る．この時間を最初の歩行信号の周期開始時間とする．次に最初の周期の終了時間は開始時間後から 800～1200ms 内の振幅最小値の時間とする．この一定時間内の最低振幅値の時間を取得する処理を繰り返し，周期の終了時間として取得し，セグメンテーションを行う．

テンプレート信号の生成

標準的なテンプレート信号の生成を複数のフレームから行う．同一人物の 6 個のフレームを 1000ms（100 サンプル）の周期に線形に正規化し，対応する時間の振幅を比較して，その中央値をテンプレート信号の振幅とする．各時間における振幅が，全て 6 個の信号の中央値で構成された 100 サンプルの標準テンプレートを生成する．

照合

テンプレート信号と，100 サンプルに周期を正規化された入力信号との間でマンハッタン距離を計算する．得られた距離に閾値を設定し，認証の受理または拒否を決定する．

なお，この研究で報告された EER は 7.3%であり，個人認証システムとして十分な認証精度を達成していない．

問題点 2：低い認証精度

表 2-1 が示すように、体の一箇所に 1 個の所持したセンサを用いた従来研究では、被験者数が増すと認証精度が悪化しており、個人認証法として実用化が可能な高い認証精度を達成している研究は存在しない。1 個の加速度センサまたは、1 個の角速度センサを使用した従来研究について、認証精度低下の要因を分析する。

2.4.1 歩行動作信号の性質による精度低下の要因

要因 1 1 個のセンサ計測信号による認証高精度化の困難さ

従来研究は認証に用いるセンサの個数という観点では、以下の 2 種類に分類することができる。

- (1) 1 種のセンサ 1 個を用いた歩行認証法
- (2) 1 種のセンサ複数個を用いた歩行認証法（複数部位にセンサを装着）

(1)の手法については、認証手法として信号自体を特徴量として信号間距離により認証する手法や、信号から多次元の特徴ベクトルを抽出して認証する方法など、様々な認証アルゴリズムが提案、評価されている。しかしながらどの研究においても高い認証精度を達成するには至っていない。1 センサで計測した歩行動作信号による認証は高精度化達成は非常に困難な問題であると考えられる。

この問題への対策として、(2)の手法を採用した研究が報告されている。非常に高い認証精度を達成している研究が存在するが、身体の数部位にセンサを装着すること自体が非常に煩雑な作業であり、日常的に利用するスマートフォンの認証法としてユーザが受け入れられることは難しい。これらの研究結果から複数センサを利用することで歩行認証の高精度化実現は可能であると考えられるが、ユーザの利便性を考慮した装着方法とその認証アルゴリズムが必要と考えられ、従来研究では両立は実現できていない。

要因 2 歩行信号の多様性への対応

歩行信号は、2 歩 1 周期の準周期信号であり、その時々における突発的な変化（以後、「ゆらぎ」と表記）が含まれる。歩行時の手の振り方、進行方向のわずかな変化など様々な要因が引き金となって、ゆらぎが生じると考えられる。したがって、個人の歩行信号は

歩行速度の変化等により線形や非線形に変化するだけに留まらず、様々に変化する可能性があると考えられる。同一人物の信号において、非線形に信号を伸長する DTW でも整合処理が対応しきれず、信号間距離が通常より大きな値になる可能性がある。多様な歩行信号に対応するためには、各ユーザの多様な信号同士で照合が行える法が必要であると考えられる。この問題について、以下の従来研究手法が対応していると考えられる。

- 複数の信号から、ユーザの標準的なテンプレート信号を生成する手法[81]
- 複数テンプレートと複数入力信号を使用し、全組み合わせで距離計算をする手法[76]
- 歩行信号の変化に影響されない人物固有の特徴量を信号から抽出して認証する手法

ユーザの標準的なテンプレートの生成法では、テンプレート信号は標準的な信号に近づくための処理が適用されるものの、入力信号については標準的な信号にはならない。したがって、標準テンプレートと同一人物の入力信号が、標準から大きく外れた信号であった場合は、テンプレートとの間で計算される距離は小さくならず、誤認証をしてしまう可能性が存在する。一方、複数テンプレート信号と複数の入力信号を使用する手法における問題点は、認証を行う際に、複数周期の歩行信号を測定する必要があることから、長距離の歩行をユーザが強いられる点である。歩行認証の利便性が低下する手法であるため、歩行認証の意義を大きく損なうこととなる。

人物固有の特徴量を抽出する手法については、従来研究において様々な特徴量が導入されているが、表 2-1 で示した通り、信号そのものを照合する認証法に比べて被験者数が多くなると認証精度が低くなる傾向を示している。つまり、従来研究手法は歩行動作の変化に影響を受けない、その人物固有の特徴量の抽出は実現できていないと考えられる。

要因 3 精度の低いセグメンテーション手法

信号間距離による認証では、信号波形の類似性を評価することから、正しく準周期信号の境界を決定できることが非常に重要である。歩行認証における従来研究では、固定ウィンドウによる認証用信号の抽出法[71][72][73]や、単純に一定区間内の振幅最小値を採用している[81]。歩行信号は準周期信号として計測されることから、固定ウィンドウによるセグメンテーション手法では周期の変化に対応できず、抽出信号にずれが重畳される結果に繋がる。

また、歩行信号は複数の極大値や極小値が近傍に連続して存在することが多く、それらの大小関係が逆転することもある。単純に一定時間内の振幅最大値（最小値）となる時間とする手法では、信号の境界を誤る可能性が高い。Derawi らの手法[76]では、隣接する極大値もセグメンテーションの境界として検討するものの、準周期信号全体を比較する手法ではないため、正しい境界を得られる可能性は著しく高くすることはできないと予想される。

周期の境界として、音声認識で用いられることのあるピッチ周波数を利用する手法も考えられるが、ピッチの抽出には一定サイズのウィンドウにより分析を行うため、一定時間内のどこかに境界があることは分析できるが、時間領域での手法のように、特定の時間を示すことはできない。

2.4.2 加速度センサにおける精度低下の要因

表 1-2 に示したとおり従来研究では加速度センサを用いた認証法が多数を占めている。しかしながら単独のセンサのみで高い精度を達成した研究は存在していない。認証精度向上のために加速度センサ固有の問題について説明する。

要因 4 端末装着位置の違いによる歩行動作測定加速度の変化

円運動を計測する際、加速度は運動の中心からの距離に比例した値が測定される。つまり、加速度センサで完全に同一の円運動を計測した場合であっても、2つのセンサの運動の中心からの位置が異なる場合は測定される信号の大きさが、対応する時間において等しい値にならないことになる。歩行動作も股関節を中心とした円運動と考えることができることから、測定位置の距離に起因する振幅値の差に対応できる認証法が必要となる。

歩行動作認証において、ズボンポケット、つまり大腿部上部に固定したセンサは脚に一体化して回転運動を測定する。歩行動作を単純な円運動とした場合、図 2-6 に示した軸方向に、加速度センサと角速度センサを取り付けた際の各軸の加速度と角速度の関係は以下の式で計算される。

センサ X 軸

$$a_x = r \frac{d\theta^2}{dt} \quad (3.1)$$

センサ Z 軸

$$a_z = r \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.2)$$

センサ Y 軸については，股関節を中心とした角度を φ ，鉛直方向との角度を α とする円錐運動の加速度を検出すると仮定する．

センサ Y 軸

$$a_y = r \sin \alpha \frac{d\varphi^2}{dt} \quad (3.3)$$

検出される加速度は，共通の値である股関節からの距離 r に比例した値となる．したがって，股関節からの距離に，測定される値は r に影響を受けると考えられる．

測定デバイスの位置のずれは，以下のことが原因で発生すると考えられる．

- 使用に伴う端末出し入れによる端末装着位置の変化
- ズボンポケットなど弱い端末保持力に起因する，歩行動作に伴う端末位置のずれ

高精度な認証法を実現するためには，この問題に対応可能な認証手法が必要になると考えられる．センサの位置のずれについて，運動の中心距離に言及している歩行認証の研究は存在していないが，以下の手法がこの問題へ対応している可能性が考えられる．

- 認証に使用する各信号から，その信号の平均値を減ずる手法[82]
- 振幅を 1～-1 の範囲に正規化する手法[77]
- 正規化相互相関を基にした類似度計算手法[77]

装着位置の変化による振幅の変化は距離の比例となる．したがって直流成分のみが増加するのではないことから，単純に平均値を減ずる手法では本人同士の信号であっても差が生じ，この問題に対応することが出来ない．

振幅を正規化することは有効と考えられるが、歩行動作信号は準周期信号である。したがって、同じ距離にセンサが装着されていても、その準周期信号中の最大振幅値や最小振幅値を含めた全ての振幅値は、その歩行ごとに独立した変化をすると予想される。したがって、振幅最大値や最小値のような特定の振幅値のみに注目した正規化方法では、同一人物の各準周期信号を信号全体としてみた時に類似性の高い信号に正規化出来ない可能性があり、手法としては不十分である。

正規化相互相関については、類似度計算を行うためにはテンプレート信号と認証用の信号の周期の長さを同一にする必要がある。この問題に対応するため、従来研究では線形に信号を伸縮することで周期の長さを同一にしていたが、高い認証精度を達成することはできていなかった。歩行動作は両脚の運動が相互に関係するため、その信号の変化は線形に生じるとは限らないと考えられる。正規化相互相関そのものは加速度の測定位置の違いに対応できる手法と推測されるが、類似度計算のための非線形な信号の変化に対するマッチング手法が導入できないため、この課題に対応する手法としては十分ではない。

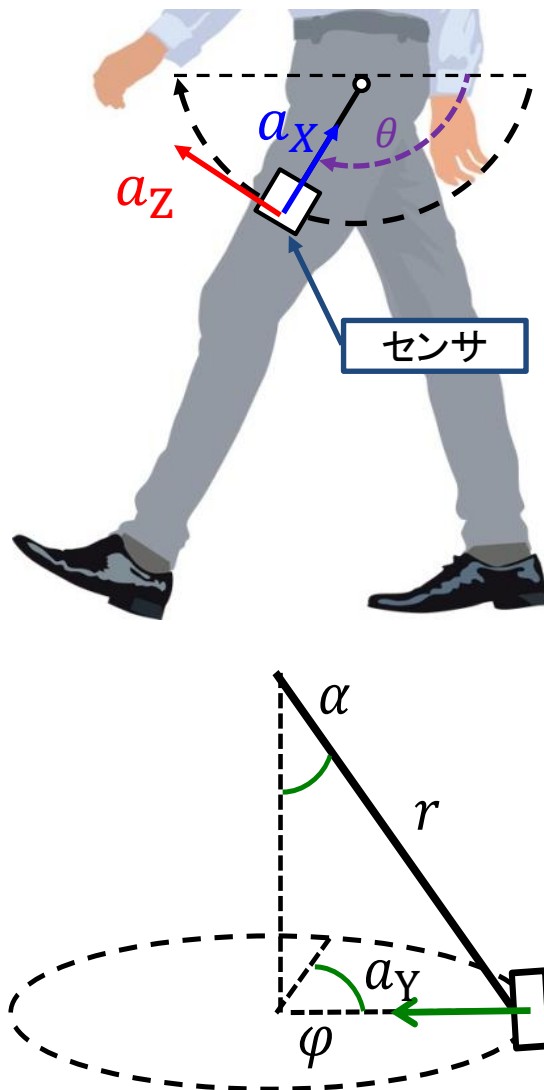


図 2-6 歩行運動を単純化した動作モデル

2.4.3 角速度センサにおける精度低下の要因

要因 5 角速度信号の準周期性が考慮されていない認証手法

角速度は円運動を計測する際には、その中心の距離によって値が変化するという問題は存在しない。したがって運動の中心からの距離についての問題は考慮する必要が無く、歩行動作の計測に適したセンサであると考えられる。しかしながら歩行認証において角速度センサを用いている事例は非常に少ない。

寺田らの研究[69]は角速度信号を用いた認証手法を提案し、精度を評価している。この認証法は計測した入力信号とテンプレート信号の長さを線形に正規化する。そしてセンサを固定した脚の遊脚期間の部分信号のみを認証用の信号として使用している。遊脚期間の信号は 2 歩 1 周期の 40% を占めるとして固定ウィンドウにより抽出し、テンプレート信号と入力信号のユークリッド距離を求め、閾値処理により認証をする。この手法には以下の 2 点の問題点が存在する。

- 各 2 歩 1 周期の信号における非線形な変化が考慮されていない
- 振幅の変化が考慮されていない

この手法では個々の信号の長さを線形に揃えて、更に固定した割合でセグメンテーションを実行している。したがって、同一人物の非線形に変化した 2 つの歩行信号を正しくマッチングすることはできない。本人の信号間距離であっても距離が大きく計算され、誤認証の原因となると考えられる。また、歩行速度の変化などに起因する振幅の変化についても考慮されていない。

第3章 提案手法

3.1 本研究の提案手法

本研究では、先に述べた認証精度低下の複数の要因に対応するために、1つの認証システムに、以下の複数の手法を導入することを提案する。

1. SVMを用いて本人／本人以外の認証を行う際に、入力信号とテンプレート信号間で算出した以下の複数の距離を特徴量とすることにより、認証精度を改善する。
 - (1) 3軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離
 - (2) 角速度信号のマンハッタン距離
 - (3) 加速度信号のマンハッタン距離

また、認証精度向上に寄与する信号間距離を取得するために、以下の手法を歩行認証のプロセスへ導入する。

2. 時間領域における認証用信号の抽出手法
3. テンプレート信号の複数選出による距離計算法

以下に提案手法の詳細について解説を行う。

1. SVMを用いた複数の距離を特徴量とする認証方法

本研究では、1個のセンサでは歩行認証の精度向上が困難である課題の克服のために、マルチバイオメトリクス of 1 手法である複数のセンサで1つのモダリティを計測するマルチセンサを導入する。更にテンプレートと入力データ間のスコア（距離や類似度）を1つの特徴ベクトルとして認証を行う、「スコアレベル Fusion」を導入する。

従来研究の問題点として、1個のセンサを用いた歩行認証は、高い精度を達成できていなかった。また、一部の研究で採用されていた複数センサを身体 of 複数箇所に装着する認証法は、ユーザへの負担が大きく、歩行認証を実現する意義が失われる。

マルチセンサは、従来歩行研究で採用されてきた体の複数部位にセンサを固定するマル

チモーダル認証とは異なり、身体の一つの部位を複数のセンサで計測する手法である。1 台のスマートフォンに複数のセンサを搭載することは可能であるため、ユーザに負担をかけることなく実現できる。使用するセンサとしては従来研究で多く使用されてきた 3 軸加速度センサに加えて、スマートフォンに標準的に搭載されることが多い 3 軸角速度センサを使用し、2 種のセンサを併用した認証を行う。角速度センサは、関節の運動を計測する際に、関節からの距離に測定値が影響を受けない利点も存在する。

SVM に入力する特徴量として、信号間距離を採用する。従来研究では信号から特徴量を抽出した認証法は高い精度を達成できていなかった。例えば、SVM を用いた歩行認証の従来研究[73]では、加速度信号から抽出した特徴量（信号の振幅平均値や実効値、メルケプストラム係数やバークスケールケプストラムなど）を抽出し、SVM で識別する手法が検討されている。しかしながら、その EER は被験者 36 人で約 10%であった。パターン認識において「一般に認識系は、この特徴抽出をいかに巧みに設計するかで性能の大半が決定づけられてしまう」[86]とされる。個々の信号に対して高精度に認証可能な特徴量を採用したほうが、より高い認証精度を達成できると考えられる。信号間距離は、2 つの信号の振幅情報及び時間情報を比較し、1 つの値に集約したものと考えることができる。単一センサを用いた従来研究において、信号間距離を用いた認証は、抽出した特徴量による認証法と比べて高い精度を示していたことから、ポケットに所持したスマートフォンの複数センサ計測信号から算出した信号間距離を多次元の特徴量とし、識別器を使用して認証を行うスコアレベル Fusion は高精度化達成の可能性があると考えられる。

(1) 3 軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離（3 軸加速度ベクトル距離）

加速度センサは運動の中心からの距離に比例して振幅が変化することが課題として存在した。本研究ではこの問題に対応する信号間の距離計算法として 3 軸加速度ベクトルの方向の違いを距離として評価する手法を導入することを提案する。

歩行動作やポケットへの端末の入れ直しによって端末が移動し、運動の中心からの距離 r が変化しても、式(3.1)～(3.3)が示す通り、計測される加速度は距離 r に比例した値となる。端末の装着位置により振幅の大きさが影響を受けても、各軸の信号は距離に比例した値となることから、そのベクトルの方向は変化しないと考えられる。

本研究では同時刻における 3 軸加速度角度差を距離として評価するために、コサイン類似度に基づいて 3 軸加速度の方向を評価する計算法[87]を導入する。加速度信号間の距離

を、各時刻における 3 軸加速度の成分をベクトルとして捉え、コサイン類似度の逆関数を計算する．これを DTW へ導入することで非線形に信号を伸長してマッチングしながら、加速度の方向の違いのみを評価することができる．これにより、正規化相互相関では対応できなかった非線形に変化した歩行加速度信号にも対応することが出来る．

テンプレート信号として使用するユーザの 3 軸加速度準周期信号において、 i 番目に計測された加速度振幅値を要素とした 3 次元ベクトルを $\mathbf{a}(i)$ とする．同様に、認証を試みるために入力された 3 軸加速度準周期信号における j 番目の加速度を要素としたベクトルを $\mathbf{a}'(j)$ とする．各々の 3 軸加速度ベクトルは、XYZ 各軸で観測された加速度振幅値を要素とする以下の 3 次元ベクトルと定義することができる．

$$\begin{aligned}\mathbf{a}(i) &= (a_x(i), a_y(i), a_z(i)) \\ \mathbf{a}'(j) &= (a'_x(j), a'_y(j), a'_z(j))\end{aligned}\tag{3.1}$$

この 3 次元ベクトルを用いて 3 軸加速度角度差は $\text{dist}(\mathbf{a}(i), \mathbf{a}'(j))$ は以下の式により計算される．

$$\text{dist}(\mathbf{a}(i), \mathbf{a}'(j)) = \arccos \frac{\langle \mathbf{a}(i), \mathbf{a}'(j) \rangle}{\|\mathbf{a}(i)\| \|\mathbf{a}'(j)\|}\tag{3.2}$$

式(3.5)は 3 軸がなすベクトル 2 つベクトルの向きが同一であれば、ベクトルの大きさが異なっても距離は 0 となる．したがって、3 軸加速度角度差を評価することで、端末所持位置の距離に左右されない、時間ごとの動作の方向の相違性を評価することが出来る．

この手法の導入は、認証に利用する距離同士の独立性を高めることによる認証精度向上の効果も期待できる．バイオメトリクス of 1 手法であるマルチセンサは同じモダリティを異種センサで計測する手法であるが、測定対象が同一であるためセンサ計測データ同士の独立性が低く、異なる部位の認証手法を組み合わせるマルチモーダル認証と比較すると大きな精度向上が望めないとされている．加速度は円運動の式から明らかのように、角速度もしくは、角速度の変化量である角加速度に基づいて発生すると推測される．本研究は加速度センサ・角速度センサ両方から得られた特徴量を基に認証精度の向上を試みるが、加速度と角速度両方の大きさを評価すると互いの信号の独立性の低さから、認証精度向上に

寄与しない可能性が予想される。本手法により、加速度は大きさではなく方向を評価することから、角速度信号とは独立性を高めた特徴となり、単純に各々の大きさを評価するよりも、精度向上に寄与する可能性があると考ええる。

(2) 角速度信号のマンハッタン距離と(3) 加速度信号のマンハッタン距離

角速度センサを使用した従来歩行認証の研究、特にポケットに所持した場合については、歩行信号の周期や振幅の違いを考慮し、高精度に認証できる照合法は存在していない。本研究では、周期の変化に対応する信号の整合手法として、従来研究でも採用されてきたDTWを採用する。

更に本研究の提案手法として、角速度信号の準周期性に対応する最適な距離計算手法を行うための振幅正規化手法として、本研究では振幅値をその周期ごとの2乗平均平方根で正規化する手法を提案する。セグメンテーションにより取得した各準周期信号を、その準周期信号自身の2乗平均平方根で各振幅値を除算することで、実効値1の準周期信号とする。この振幅正規化を適用したテンプレート信号と入力信号を基に信号間距離を計算することで、従来採用される手法よりも高い精度で認証を行うことが可能であることが予備実験の結果から得られている。これらの振幅正規化手法決定のための予備実験については付録D.2に詳細を記述した。

なお、予備実験の結果より、加速度信号についても1軸の信号で最も高精度に認証ができる手法は角速度センサと共通の正規化手法であると明らかになった。このため、単一軸加速度の信号間距離を求める振幅正規化手法についても、RMS振幅正規化を採用した。前処理なども含めた提案する、単一センサ単一軸信号を基にした照合法の詳細を表3-1に示す。

表 3-1 提案する単一センサ単一軸信号による照合法の各種設定

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	9 点
信号の整合法	DTW
振幅の正規化	RMS
距離計算法	マンハッタン距離

2. 時間領域における認証用信号の抽出手法

信号間距離は連続して計測される歩行信号から同じ動作区間の信号を正確に抽出できないければ、信号波形は異なった波形となることから、同一人物の信号間距離であっても大きな値となり、誤った認証結果を示す。歩行信号は 2 歩 1 周期の信号は類似した信号波形を繰り返し生成されるが、周期や振幅が、その準周期信号ごと異なる。そのため、この周期や振幅の変化に対応した、セグメンテーション手法が必要となる。従来の固定ウィンドウによる手法は周期の変化に対応することはできない。また、歩行信号は滑らかな変化をせず、多くの極大値を持った信号として観測されることから、一定時間内の振幅最大値（または最小値）を採用する手法では、極大値の大小関係が逆転した時に周期の終わりの位置を誤る可能性がある。

本研究では一定区間内の極大値を全て周期の境界候補として選出し、DTW を使用して以前の周期と照合することにより、適切な境界を選出する手法を提案する。極大値の大きさではなく、信号間距離を基に決定するため、より信号波形に近い極大値を準周期の境界として選出することが可能である。同一人物の歩行信号は類似の信号が繰り返し生成されることが既知であるため、この手法を適用することが可能となる。アルゴリズムの詳細については付録 C に記載を行った。

3. テンプレート信号の複数選出による距離計算法

個人の歩行信号は多様に変化する可能性が存在する。照合する信号同士が 1 つでは、信号の多様な変化に対応できず、同一人物の信号間距離であっても大きな値となり、誤って認証要求を拒否する可能性が存在する。

本研究ではこの精度低下の要因に対応するために、事前登録信号からテンプレート信号を複数選択して使用する。その一方、入力信号についても複数信号を選択して照合に利用することは、歩行認証においては長距離を歩行しなければ認証できないことになる。これは歩行認証における簡便さを損なう大きな要因となるため、本研究では入力信号数は 1 周期（2 歩）とする。本研究では歩行動作における「ゆらぎ」の影響を抑制するために、 N 個のテンプレート信号と、1 周期の入力信号の間で N 個の距離を求め、その中央値を信号間距離として採用する。これは「ゆらぎ」による以下の事象を防ぐためである。

(問題 1) 同一人物の歩行信号間距離が極端に大きくなるのを防ぐ。

(問題 2) テンプレート自体が「ゆらぎ」により、本人より他人と類似した信号になった場合、他人入力信号との距離が極端に小さく計算され、誤認証されることを防ぐ。

(問題 1)を防ぐためには、 N 個の距離から最小値を採用するという手法もあるが、その場合は(問題 2)が原因となる誤認証を防ぐことはできない。また、複数得られた距離の平均値を認証に利用する手法は、複数のテンプレートの中に異常なテンプレート信号が存在し、本人同士の信号間距離が極端に大きな値として計算された場合に、他人を大きく上回る平均距離が計算される可能性があるため、誤認証の原因となる。したがって、平均値ではなく、中央値を複数テンプレート使用時の距離として採用するのが妥当であると考えた。この手法の導入により、利便性を損なうことなく認証精度の向上が期待できる。

マルチサンプルとは、マルチバイオメトリクス of 1 手法であり、1 つのモダリティを複数計測し、複数の測定データを基に精度向上のための処理を行うことの総称である。本研究で採用するテンプレート信号を複数とし、1 つの入力信号との間で信号間距離を計算する手法は、マルチサンプル of 1 手法と捉えることが出来る。

3.2 認証システムの概要

図 3-1 に本研究で提案する認証システムの概要を示す。システムはテンプレート信号と入力信号の間に計算された複数の距離を特徴量とし、入力された距離が同一人物の信号間で計算された距離であるか、異なる人物の信号間で計算された距離であるかを識別する。テンプレートと同一人物であると識別されれば、認証要求を受理し、異なる人物であると識別されたら認証要求を拒否する。識別器としては放射性基底関数を導入した非線形 SVM を採用する。このため、本手法は 2 つのフェーズからなる。各々のフェーズについて処理概要を述べる。

フェーズ 1：識別関数のパラメータ決定のための学習フェーズ

認証を受理するか棄却するかを適切に判断するために、訓練データを基に SVM による学習を行う。事前に複数の人物の信号を DB に登録し、歩行信号間で距離を計算し、得られた距離をパラメータ決定用の訓練データとする。手順は以下のとおりである。

- 手順 1 学習用に収集した信号の平滑化を行う。
- 手順 2 連続した歩行信号にセグメンテーション手法を適用し、抽出された準周期信号をデータベースに登録する。
- 手順 3 同一ユーザの事前登録信号同士の距離（正例とする）及び、そのユーザの事前登録信号と他のユーザの事前登録信号との間の信号間距離（負例とする）を算出する。この処理はユーザの DB に存在する全ての事前登録信号について実施する。
- 手順 4 得られた全ての信号間距離を基に SVM を用いて学習を行う。

フェーズ 2：識別関数を使用した認証フェーズ

認証のフェーズでは、認証を行うためにシステムへ入力された歩行信号と、事前に登録された信号から選出したテンプレート信号との間で信号間距離を求める。次に 3 軸加速度ベクトルの角度差または、軸ごとに求めた信号間距離を識別器へ入力し、その出力を求める。この値に対して閾値処理を適用して認証を行う。以下に手順を述べる。

- 手順 1 認証を行うために入力された歩行信号の平滑化を行う。

- 手順2 連続した歩行信号に対してセグメンテーション手法を適用することにより，入力信号として準周期信号を得る．
- 手順3 ユーザの事前登録信号からテンプレート信号を選出し，入力信号との間で信号間距離を算出する．
- 手順4 各センサ各軸信号から得られた複数の信号間距離を識別関数に入力し，その出力を得る．
- 手順5 出力に対して閾値を設定することで，認証を受理するか，拒否するかを決定する．

本研究ではスマートフォンの認証法として歩行認証を利用することから，識別器や他人を含めた歩行信号を保持するDBはそのユーザの端末に収められることと想定する．実際の利用を考えた場合，ユーザ自身が他人の歩行信号を収集することは困難であることから，事前にシステム開発企業が他人の歩行信号データを収集し，認証システムを構成するための学習データとして提供を行う．提案認証システムを利用する際は，端末を所持したユーザの信号のみを登録する．

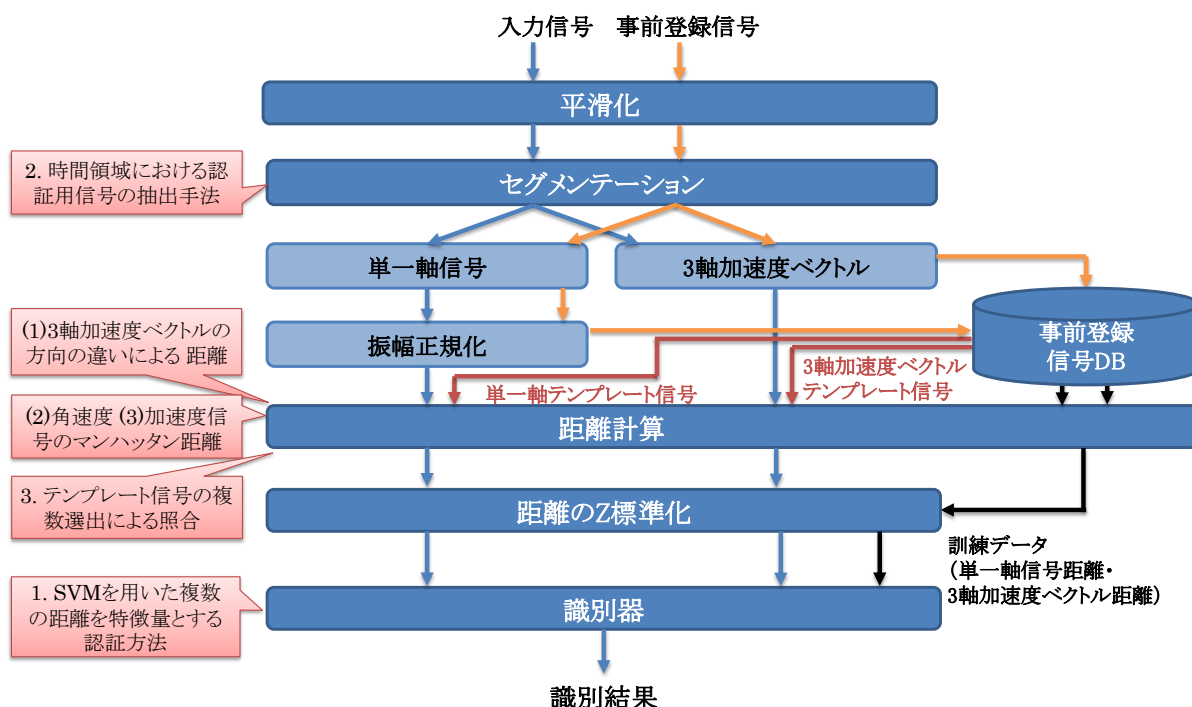


図 3-1 提案する認証システムの処理フロー

3.3 認証システムの実装

3.3.1 測定信号の平滑化

計測した信号には、歩行動作による衣服との摩擦などによって生じるノイズが含まれることが考えられ、本研究では Savitzky–Golay 法[88]による平滑化を適用する。歩行認証では移動平均フィルタを適用する研究が多く存在する。これらの手法は、ノイズを除去し、信号を平滑化するだけでなく、信号全体を歪ませる効果が存在する。本研究は信号同士の距離により認証を行うことから、信号波形が歪むことは認証精度悪影響をおよぼす可能性が存在する。このため、本研究では移動平均フィルタを採用せず、Savitzky–Golay 法による多項式あてはめによる平滑化を採用した。本研究で観測した各種信号に対する最適なフィルタ点数は、単一距離の精度検証実験を繰り返すことで決定した。この検証過程については付録 D.3 に記載した。

3.3.2 時間領域における認証用信号の抽出手法

セグメンテーションの処理手順を図 3-2 に示す。セグメンテーションの処理は鉛直方向の加速度を基に行う。歩行開始時間の検出は、加速度が閾値を越えた時間とし、その時間からセグメンテーション処理を開始する。次に歩行開始から一定時間内の鉛直加速度最大値を探索する。加速度最大値を利用する理由については、付録 B の予備実験で行った歩行動作と加速度の分析結果に基づいている。

最初の 1 周期については前の振幅最大値近傍信号と、一定時間内に存在する極大値近傍信号との相関性を基に判断を行う。最も正規化相互相関の高い極大値までを 1 周期とする。以降の周期信号については、極大値に基づき周期終点時間候補をリストアップし、周期の始点から各終端候補までの部分信号と、その前に抽出された周期信号との間で距離を求め、距離が最小になる極大値を次の周期の開始時間とする。

その後、抽出された信号から歩行初期の安定状態ではない信号を取り除くため、分散の値に基づき抽出信号の削除を行った。得られた抽出信号の時間に基づき、他の軸、他のセンサの測定信号もセグメンテーションを実行してセグメンテーションを実施した。本研究で提案したセグメンテーションのアルゴリズムの詳細は付録 C に記載した。

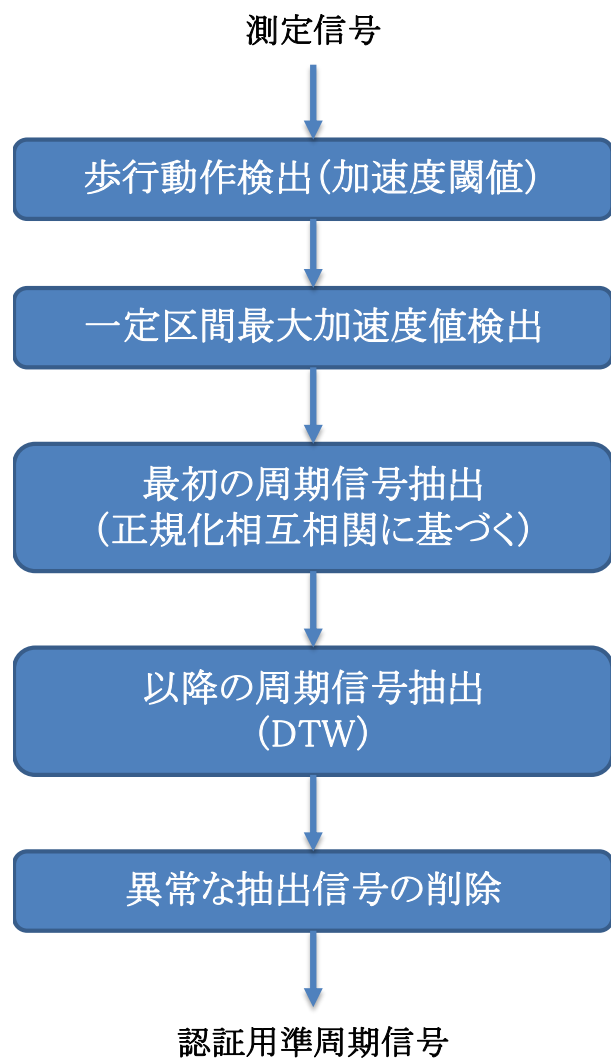


図 3-2 提案するセグメンテーションの処理フロー

3.3.3 振幅正規化

各センサの軸ごとに距離計算を実行する場合は、抽出された準周期信号は振幅の正規化を適用する．その準周期信号自身の 2 乗平均平方根で各振幅値を除算することで、セグメンテーションにより取得した各準周期信号を実効値 1 となる信号とした．時系列信号 $\mathbf{X} = \{x(i)|i = 1, 2, \dots, m\}$ の 2 乗平均平方根 \mathbf{X}_{RMS} は以下の式で計算される．

$$\mathbf{X}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x(i)^2} \quad (3.3)$$

振幅正規化手法決定のための予備実験については付録 D.2 に詳細を記述した．

3.3.4 距離計算

本研究では入力信号と事前に登録された信号から選出されたテンプレート信号との間で距離を算出し、その距離を基に同一人物であるかの判断を行う．

本研究で認証に使用する歩行信号は同一人物であっても振幅や周期が異なる準周期信号として、連続した歩行信号から分離・抽出される．本研究では、長さの異なる様々な時系列信号の整合に使用される DTW を用いて、2 つの信号の整合を行う．

GP（ギャップペナルティ）を用いた DTW の計算法

DTW はマッチングの際にある時刻の振幅の重複を許す場合と、文字などの照合で採用される重複に対してペナルティを与える計算方法が存在する．信号を伸長した際にペナルティを課すことで、信号の 1 部分だけを極端に伸長する操作を抑制することができる．本研究では GP による照合方法を採用した．

2 信号 $\mathbf{X} = \{x(i)|i = 1, 2, \dots, m\}$ と $\mathbf{Y} = \{y(j)|j = 1, 2, \dots, n\}$ の距離計算を行う DTW において、重複に対してペナルティを課す信号間距離 $DTW(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ を以下に示す．信号の伸長に対してペナルティを与える「GP あり」の場合の DTW の計算法において、信号のある時間の振幅を重複してもう一方の振幅へマッチングをする際は、ギャップペナルティ GP が距離合計値に加算されるように式を定義した．

手順 1 初期化

$$f(0,0) = 0, f(1,0) = f(0,1) = \infty \quad (3.4)$$

手順 2 最適なマッチングの計算

$$f(i,j) = \min \begin{cases} f(i-1,j-1) + \text{dist}(x(i),y(j)) \\ f(i,j-1) + \text{dist}(x(i),y(j)) + GP_i \\ f(i-1,j) + \text{dist}(x(i),y(j)) + GP_j \end{cases} \quad (3.5)$$

手順 3 距離計算終了

$$DTW(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = f(m,n) \quad (3.6)$$

本研究では以下の値をギャップペナルティとして設定した.

3 軸加速度ベクトル距離の場合

$$GP_i = GP_j = \frac{\pi}{8} \quad (3.7)$$

角速度信号のマンハッタン距離, 加速度信号のマンハッタン距離の場合

$$GP_i = |x(i)|, GP_j = |y(j)| \quad (3.8)$$

距離 $DTW(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ は周期の変化に対応できる必要がある. 認証に使用する信号の周期が長くなるほど, 距離も大きくなると予測されることから, 信号の合計長さで正規化を行い, 1 サンプルあたりの距離を認証に使用した. この距離 $D(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ は以下の式で求める.

$$D(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{DTW(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{m+n} \quad (3.9)$$

3 軸加速度ベクトル距離の計算方法

本研究では認証精度向上のため、単一軸信号を基にした距離計算に加え、3 軸加速度ベクトルを基にした距離計算法を導入することを提案した。式 (3.2) を DTW の式(3.5)の距離計算項 $dist(x(i), y(j))$ へ導入することで、3 軸加速度ベクトル同士の距離を計算した。

角速度信号間距離、加速度信号間距離の計算法

DTW で信号間距離を計算するためには、式(3.5)の距離計算項 $dist(x(i), y(j))$ に信号間距離の計算式を導入する必要がある。従来研究では、マンハッタン距離が良好な認証精度を示すとの報告[85]がなされており、本研究においても予備的検討の結果、同様の結果となった。マンハッタン距離として計算するために、以下の式を式(3.5)へ導入した。

$$dist(x(i), y(j)) = |x(i) - y(j)| \quad (3.10)$$

距離計算法の検討結果は付録 D.1 に記載した。

テンプレート信号の複数選出による照合手法

信号間距離を $D(X, Y)$ とする。本研究で導入する「マルチサンプル」による認証は N 個のテンプレート信号を使用してその中央値を距離として出力する。テンプレート信号は以下のような準周期信号の集合と考えられる。

$$\{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\} \quad (3.11)$$

したがって、マルチサンプル導入による N 個のテンプレート信号から出力される距離 $D(X, Y)$ は、以下となる。

$$D(X, Y) = \text{median}_{k=1,2,\dots,N}(D(X, Y_k)) \quad (3.12)$$

3.3.5 ユーザ共通識別器

使用する識別器はガウシアンカーネルを導入した SVM である。本研究ではユーザ個々に識別器を生成するのではなく、全ユーザ共通の識別器により本人認証を行う手法を採用す

る。この理由は、識別器を構成する際の問題として、開発者側がシステムを使用するユーザの歩行信号を予測し、ユーザごとに類似の他人の信号を収集することが困難なためである。精度の高い識別器を作成するためには、歩行信号が著しく異なる人物のみを学習データとして使用するよりも、認証する人物と信号が類似している人物の信号を、拒否すべき他人の信号として学習し、各種距離に対する適切なパラメータを決定する必要がある。しかし、測定した信号から実際の歩行動作を予測することは難しく、そのような類似の信号を有する人物を選んで、他人の信号として収集をすることは、ユーザの信号がシステムへ登録された後であっても困難であると考えられる。したがって、そのユーザのみの事前登録信号だけでは、類似の人物との間で学習データを生成することは、歩行認証においては困難であると予測される。

署名のオンライン認証に関する研究[89]において、ユーザごとに、その人物のなりすまし署名を大量に収集することは困難であることから、訓練データからユーザ依存性を無くし、ユーザ共通識別器を構成することで認証精度を高める手法が報告されている。この操作により、ユーザの区別が無い本人・他人の 2 クラス問題とし、他のユーザのなりすまし署名も訓練データとして識別器の学習に利用ができるようになる。この研究を基に、本研究においても識別器は距離を基に認証すべき人物であるかを判定する 2 クラス分類を行うユーザ共通の識別器として構成する。本研究においてはこの研究と異なり、なりすまし者の訓練データを増やすことはできないが、学習データ生成の際に、本人信号として利用する人物を増やすことができる。したがって、事前登録した信号の中で訓練データを生成する際、本人信号が 1 名である個別識別器と比較した場合、本人－他人の組み合わせが増えることから、類似性の高い他人の信号との間で計算した距離が得られる可能性を高められる。類似性の高い他人を訓練データとして取得することにより、識別器の高精度化が実現できる可能性があるとの考えのもとに、このユーザ共通識別器を採用した。

本研究の識別器は、テンプレート信号と入力信号との間で計算された距離が同一人物の信号間で計算されたのか、異なる人物の信号間で計算されたのかの識別を行う。同一人物と判定された場合は認証要求を受け入れ、異なる人物間の距離の場合は認証を拒否する。

信号間距離の標準化

計算された距離が同一人物の信号間で計算されたのか、異なる人物の信号間で計算されたのかのみを識別するユーザ共通の識別器を構築するため、訓練データからは個人に依存

した特徴を排除する必要がある．そのため，DTW により得られた信号間距離 $D(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ に対し，Z 標準化を適用する．距離 $D(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ に Z 標準化を適用した距離 $D_s(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ は以下の式で計算することが出来る[90]．

$$D_s(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{D(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) - \overline{D(\mathbf{Y})}}{\sigma(\mathbf{Y})} \quad (3.12)$$

$\overline{D(\mathbf{Y})}$ は， \mathbf{Y} をテンプレート信号とした場合の登録ユーザ全ての事前登録信号との距離平均値を示す． $\sigma(\mathbf{Y})$ は， \mathbf{Y} をテンプレート信号として計算した場合の，全ての登録ユーザの登録信号との間で計算された距離の標準偏差を示す．これにより，各ユーザのテンプレートと入力信号との間で計算された距離の集合は，平均が 0，標準偏差 1 となる．この計算で必要となる平均値や標準偏差は事前登録信号を基に計算されるため，入力信号を含めた場合，本来の値とは異なる可能性が存在する．しかしながら，バイオメトリクス認証において，入力信号は事前に得られないため，事前登録信号のみを基に算出されたものを使用して各値の決定が行われる [59]．

学習に使用するデータ数の調整

本人信号間については 1 個の準周期信号をテンプレート信号，残りを入力信号とする全ての組み合わせで学習に使用するデータである距離（本人距離）を算出する．一方，他人の信号との間の距離（他人距離）については，他ユーザの全ての事前登録信号との準周期信号の組み合わせについて距離計算を行う．結果として他人距離算出の信号の膨大な組み合わせ数となり，正例（本人距離）の数と，負例（他人距離）の数に偏りが生じる．このようなデータを不均衡データと呼び，SVM やニューラルネットワーク，決定木のようなアルゴリズムにおいて，識別精度が悪化することが知られている．そのため，本人・他人を高い精度で識別できる識別器を構築するためには，クラスの偏りを解消してから学習を行うことが必要とされる．これを解決するために，間引きを行い，データ数を調整する方法や，クラスごとに異なるペナルティを設定し，学習を制御する方法[91]が提案されている．

本研究では k -最近傍法により得た近傍の同クラスの訓練データとの間に，新たに訓練データを追加する手法である Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) [92]を適用した．数が少ない正例は学習データを増加させ，数が多い負例はランダムに間引きを行い，

それぞれのクラスに属する学習データ数を同数に近づけてから識別器の学習を行った。

3.3.6 特徴ベクトルと認証

特徴ベクトル

入力信号とテンプレート信号から得られた距離の組み合わせによる認証性能を検証するため、3種類の距離の組み合わせを特徴ベクトルとした時の認証性能を評価した。学習フェーズにより決定した識別関数を $f(\cdot)$ とすると、出力 D_f は以下の式で計算される。

距離入力 1 : 3 軸加速度ベクトル距離と 3 軸の角速度信号のマンハッタン距離による特徴量 4 次元

$$D_f = f\left(D_s(\mathbf{a}, \mathbf{a}'), D_s(\mathbf{g}_x, \mathbf{g}'_x), D_s(\mathbf{g}_y, \mathbf{g}'_y), D_s(\mathbf{g}_z, \mathbf{g}'_z)\right) \quad (3.13)$$

距離入力 2 : 3 軸の加速度信号のマンハッタン距離と 3 軸の角速度信号のマンハッタン距離による特徴量 6 次元

$$D_f = f(D_s(\mathbf{a}_x, \mathbf{a}'_x), D_s(\mathbf{a}_y, \mathbf{a}'_y), D_s(\mathbf{a}_z, \mathbf{a}'_z), D_s(\mathbf{g}_x, \mathbf{g}'_x), D_s(\mathbf{g}_y, \mathbf{g}'_y), D_s(\mathbf{g}_z, \mathbf{g}'_z)) \quad (3.14)$$

距離入力 3 : 3 軸加速度ベクトル距離, 3 軸の加速度信号のマンハッタン距離と 3 軸の角速度信号のマンハッタン距離による特徴量 7 次元

$$D_f = f(D_s(\mathbf{a}, \mathbf{a}'), D_s(\mathbf{a}_x, \mathbf{a}'_x), D_s(\mathbf{a}_y, \mathbf{a}'_y), D_s(\mathbf{a}_z, \mathbf{a}'_z), D_s(\mathbf{g}_x, \mathbf{g}'_x), D_s(\mathbf{g}_y, \mathbf{g}'_y), D_s(\mathbf{g}_z, \mathbf{g}'_z)) \quad (3.15)$$

認証

式(1.2)を基に識別関数から得られた出力 D_f に対して、閾値 D_{th} を設定し、以下の判断を行う。

$$\begin{cases} \text{Genuine} & \text{if } D_f \leq D_{th} \\ \text{Imposter} & \text{if } D_f > D_{th} \end{cases} \quad (3.16)$$

第 4 章 提案手法の評価

4.1 実験 1 ポケットに装着したセンサにおける認証性能の評価

はじめに従来研究と同程度の被験者を用いた実験を行う。実験により、被験者数が比較的多い場合においても、歩行信号により提案手法が精度良く認証できることを示す。

4.3.1 歩行信号の測定

歩行信号は左脚大腿部に装着したセンサにより計測した。図 4-1 に示す多機能センサユニット（TSND121, ATR-Promotion 社製）を使用して、歩行時の信号を計測する。このセンサユニットの基本仕様を表 4-1 に示す。本研究では加速度センサと角速度センサを計測に使用する。各センサは互いに直交する 3 軸を持つことから、一定時刻ごとに合計 6 軸の時系列信号が計測される。

センサを被験者に装着した様子を図 4-2 に示す。異なる被験者間であっても歩行信号の類似性が非常に高く、提案手法では人物の識別が困難であると仮定した場合、ポケットにセンサを所持することにより、身につけたズボンの違いが信号に変化をもたらし、人物の識別が容易になる可能性が考えられる。衣服による影響を排除した本人固有の歩行信号による認証精度を評価するために、本実験ではセンサをポケットに収めず、ポケットの上にセンサ装着用のベルトを使用して保持させることとした。

センサの各軸の向きは、X 軸は直立時に鉛直下向きに、Y 軸は胴体側方外側に、Z 軸は大腿部後方とした。測定条件及び表 4-2、測定コースを図 4-3 に示す。測定コースは、一ヶ所左方向へのカーブが存在する。ただし、緩やかな進行方向の変更により通行することができるカーブであり、ほぼ直線の屋内廊下であると見なすことができる。

日常における歩行信号を計測するため、被験者自身が普段歩いている普通と思われる速度で歩く様に指示をしてから計測を行った。計測開始から約 5 秒間その場で直立した状態で静止した後、定められた距離を歩行し、目的の距離を歩き終わったら計測を終了した。被験者にはメトロノームなどで、歩行のタイミングや速度を通知することは行っていない。測定回数は各被験者 1 回である。



図 4-1 多機能センサユニット TSND121 外観

表 4-1 TSND121 基本仕様[26]

外形	
サイズ（幅×高さ×厚さ）	37mm×46mm×12mm
搭載センサ	
加速度センサ・角速度センサ ・ サンプルング周波数 ・ 加速度レンジ ・ 角速度レンジ	最大 1000Hz 最大±16G 最大±2000dps
地磁気センサ ・ サンプルング周波数 ・ 検出範囲	最大 100Hz ±1200 μ T
気圧センサ ・ サンプルング周波数 ・ 検出範囲	最大 25Hz 500～1100hPa

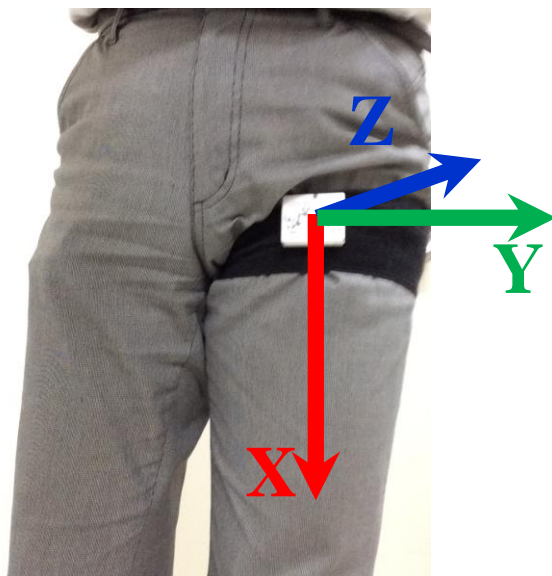


図 4-2 被験者へのセンサ装着図



図 4-3 測定コース

表 4-2 測定条件

条件	設定値
センサ保持位置	左脚大腿上部（ポケット上部）に固定
計測時間	約 70 秒
被験者数	50 人
年齢	19～21 歳
使用センサ	TSND 121（加速度・ジャイロセンサ）
サンプリング周波数	1000Hz
測定コース	函館工業高等専門学校 2F 廊下

4.3.2 データセットと実験設定

セグメンテーションを実行する前に，スマートフォンの測定性能と同等とするため，1000Hz で計測したデータの間引きを行うことによって，信号の計測周波数を 100Hz に変更した．間引き後の信号に対して，提案したセグメンテーション手法を適用し，全ての被験者から各センサ各軸 30 周期の準周期信号を取得した．

この実験では 5-分割交差検証を適用し，訓練用の信号と精度評価用の入力信号に重複が無いようにして認証精度の評価を行った．全ての被験者の各軸の 24 周期の信号は全て DB に登録されているものとし，これを事前登録信号と呼ぶことにする．残り 6 周期を認証精度評価用の入力信号とした．

マルチサンプル認証のテンプレート数は，ポケットに所持した端末に寄る認証方法を報告した従来研究[81]と比較するために，1 軸あたりのテンプレート信号数を，各軸 6 周期 ($N = 6$) とした．

事前登録信号からテンプレート信号を選出する方法は，全ての組み合わせについて選出するのではなく，認証が行われる人物の事前登録信号から計測された時間順に 6 周期の信号を選出した．1 周期ずつテンプレート信号の入れ替えを行うことで，6 周期の信号から構成される各テンプレートのセットを選出した．同一ユーザのテンプレートセットと残りの事前登録信号（テンプレートセットを除いた 18 周期分の信号）間で距離計算を行い，これを正例とする．同様にテンプレートセットと他のユーザの事前登録信号間で距離計算を行い，これを負例とする．3.3.5 に述べた正例数及び，負例数を同数に近づける処理を適用し

た後に識別器の学習を行った。

最後に入力信号に対する認証精度の評価を行う。テンプレートセットと入力信号との間で各種距離計算を行い、その中央値を識別器へ入力する距離とする。最適な距離計算法の設定条件を表 4-3、4-4 に示す。交差検証より得られた 5 個の識別器の平均 EER を認証手法の評価指標とした。

表 4-3 各センサ単一軸の信号に対する距離計算法の設定条件

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	9 点
振幅の正規化	RMS
信号の整合法	DTW
距離計算法	マンハッタン距離

表 4-4 3 軸加速度ベクトルの方向による距離計算法の設定条件

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	9 点
振幅の正規化	なし
信号の整合法	DTW
距離計算法	3 軸加速度ベクトル角度差

4.3.3 提案手法による認証精度の評価

4.3.2 節のデータセットに対して、本研究で採用した手法を適用することにより EER 及び、ROC 曲線を求め、認証精度の評価を行った。

結果

EER を表 4-5 に、ROC 曲線を図 4-4 に示す。本研究で提案する 3 軸加速度角度差を角度速度センサと組み合わせた認証法は $EER=0.8\%$ となり、個別に組み合わせる手法より高い認証精度を示した。更に全ての距離を組み合わせることで認証精度は向上し、距離入力 3 (7 次元) の $EER=0.6\%$ が最高精度となった。

表 4-5 提案手法の EER

入力した距離	EER[%]
距離入力 1 (4 次元)	0.8
距離入力 2 (6 次元)	1.3
距離入力 3 (7 次元)	0.6

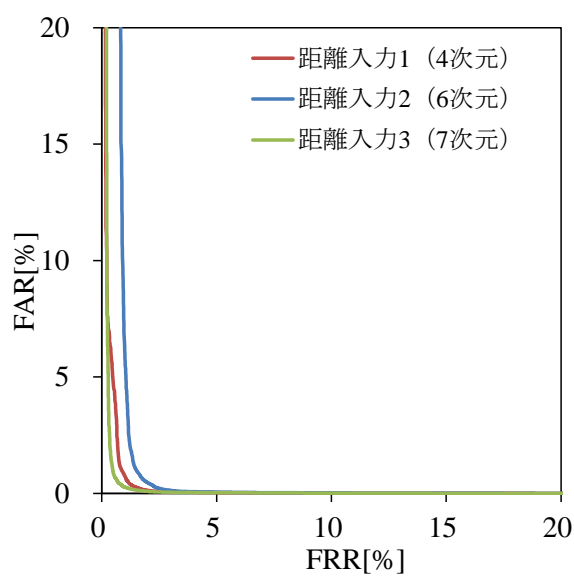
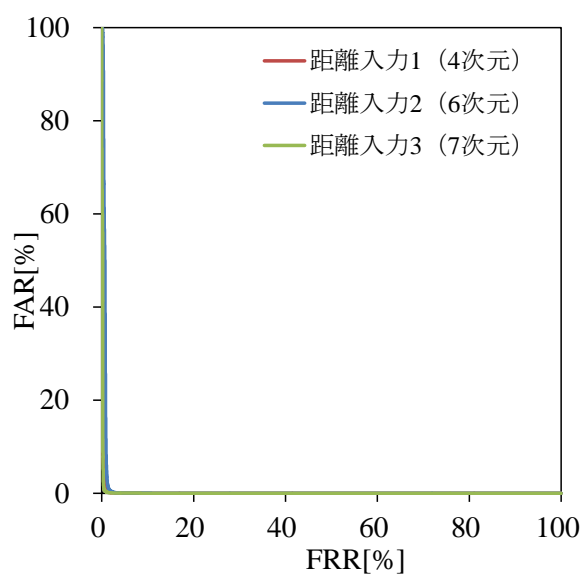


図 4-4 マルチセンサ認証における ROC 曲線（上：全体，下：0～20%の範囲を表示）

4.3.4 従来手法による認証精度の評価

従来の研究などで行われてきた手法を認証法として本データセットに適用した場合の EER を求め、提案手法の有効性を確認する。計算の際の設定条件の詳細を表 4-6～4-8 に示す。比較する従来手法の概要を以下に解説する。

- **比較手法 1：音声認識手法**

ピッチパターンによりセグメンテーションを行う。複数センサ複数軸の低次ケプストラム係数を特徴量として、直流成分を除いた各軸 9 次元、6 軸合計 54 次元の特徴ベクトルを生成する。この特徴ベクトルを入力とするガウシアンカーネルを導入した SVM により認証を行う。提案手法の評価と同じく、5-交差検証により評価を行った。

- **比較手法 2：従来研究認証手法**

ポケットに端末を所持時の認証法を報告した従来研究[81]の手法から、テンプレート生成法と、信号間の距離計算法を本研究のデータセットに適用する。6 個の事前登録信号を選出し、信号長を 1 秒（100 点）に正規化する。各時間において 6 個の信号の中央値を採用したテンプレート信号を生成し、100 点に正規化した入力信号との類似度をマンハッタン距離により求める手法である。閾値処理により、テンプレートと同一人物であるか、異なる人物であるかを判定し、認証を行う。評価は各センサ各軸の計測信号ごとに行い、認証用信号は本研究のセグメンテーション手法により得られた準周期信号を使用した。最も優れた EER が得られたセンサの軸の結果を示した。

- **比較手法 3：DTW 距離と SVM による認証**

基本的な認証法は本研究で採用した手法と同じである。ただし、本研究で単一軸信号の最適な距離計算法として採用した「RMS による振幅正規化」「Savitzky-Golay 法によるフィルタ」「マルチテンプレート」及び、提案する「3 軸加速度ベクトル距離」は導入しない。DTW とマンハッタン距離の組み合わせにより求めた各センサ各軸の距離を特徴量とし、ガウシアンカーネルを導入した非線形 SVM により認証を行う。特徴量は 3 軸加速度センサと 3 軸角速度センサ信号から求めた距離による 6 次元となる。提案手法の評価と同様に 5-交差検証により評価を行った。

表 4-6 音声認識手法の設定

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	なし
振幅の正規化	RMS
信号の整合法	振幅 0 の付加により同じ周期とする
テンプレート信号数	各軸 1 周期
特徴ベクトル	ケプストラム係数 54 次元 (9 次元×6 軸)
認証手法	SVM (ガウシアンカーネル)

表 4-7 従来研究認証手法の設定

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	9 点
振幅の正規化	なし
信号の整合法	線形補間 (100 点)
テンプレート信号数	6 周期
特徴ベクトル	マンハッタン距離
認証手法	閾値処理

表 4-8 DTW 距離と SVM による認証法の設定

設定	設定値
Savitzky-Golay フィルタ	なし
振幅の正規化	なし
テンプレート数	各軸信号 1 周期
信号の整合法	DTW
特徴ベクトル	6 次元 (6 軸信号のマンハッタン距離)
認証手法	SVM (ガウシアンカーネル)

結果

表 4-9 に各手法の EER を, 図 4-5 に ROC 曲線を示す. 比較手法 1 は $EER=6.4\%$ であった. 比較手法 2 では加速度センサ Y 軸信号を基にした認証で最高精度となり, $EER=7.8\%$ であった. 比較手法 3 では $EER=5.3\%$ であった. 提案手法と比べて, どの手法も EER は大きな値を示していることから, 提案手法は従来手法と比較して優れた性能を有していることを示す結果となった.

表 4-9 従来認証手法の EER

認証手法	EER[%]
音声認識手法	6.4%
従来研究手法（加速度 Y 軸）	7.8%
DTW 距離+SVM（提案単一軸信号計算手法未適用）	5.3%

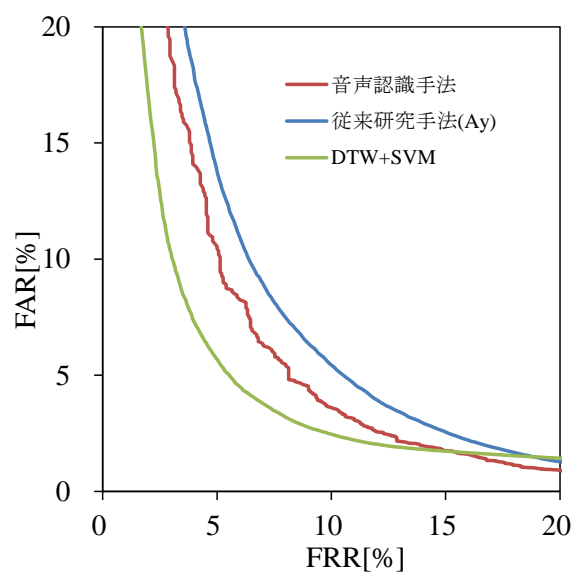
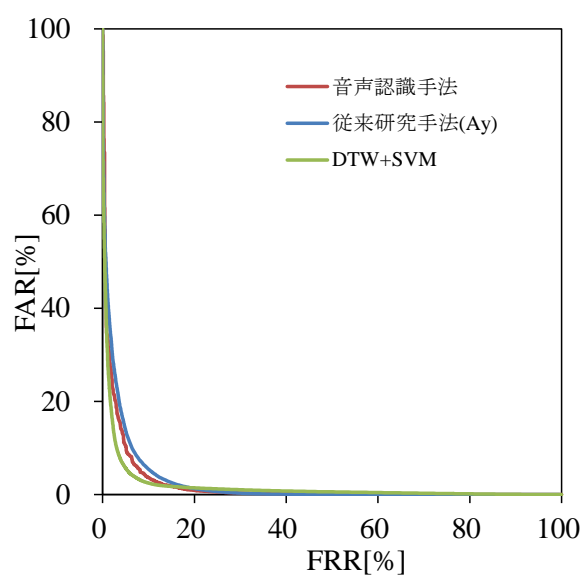


図 4-5 従来認証法における ROC 曲線（上：全体，下：0～20%の範囲を表示）

4.4 実験 2 センサの入れ直しを行ったデータにおける認証性能の評価

日常に補講認証の導入を検討した場合，端末をポケットから出し入れや歩行動作を行うことで，ポケット内の端末位置が変化し，認証精度を低下させる可能性が存在する．実験 1 では理想的な状態設定であり，端末のずれが生じにくいベルトで固定する方式を採用している．本研究の提案認証法を実際の使用環境に近づけた状況下で収集した実験データに適用し，実装した際に提案手法が精度向上に寄与するかを評価する．

4.4.1 歩行信号の測定

本実験に使用する歩行信号の測定条件を表 4-10 に記載する．ポケットにセンサ端末を収めた状態で計測を実施した．一人の被験者につき 4 回の計測を実施している．計測時に実際に携帯端末を使用した状態を模擬するために，各被験者は 1 度の計測が終了する度に，ポケットからセンサ端末を取り出し，胸の高さまで持ち上げて視認した後，ポケットにセンサ端末を収納して次の計測を実施した．センサ端末のポケット内での向きについては常に同一方向である．入れ直しによって端末の上下や表裏が変化しない条件でポケットへ収納している．

歩行するコースや歩行速度の指示については，実験 1 と同じ条件である．この実験はポケット内にセンサを保持して実施するが，センサ端末である TSND 121 はスマートフォンと比べてサイズが小さい．そのため，歩行動作計測中において，センサ端末が実際以上に激しくポケット内で振動する可能性がある．実際の使用環境に近づける目的で，センサ端末を市販されているポリカーボネイト製スマートフォンケースに固定して測定を実施した（図 4-6）．各種機器及び，参考のために市販されているスマートフォンのサイズを表 4-11 に，ケースに固定した様子を図 4-7 に示す．本ケースは市販されているスマートフォンと比べて，サイズが著しく大きいといった問題は存在していない．

表 4-10 測定条件

条件	設定値
センサ保持位置	左脚ズボンポケット内
計測時間（1 被験者あたり）	約 15 秒×4 回
被験者数	17 人
年齢	17～21 歳
使用センサ	TSND 121（加速度・ジャイロセンサ）
サンプリング周波数	100Hz
測定コース	函館工業高等専門学校 2F 廊下

表 4-11 測定装置の寸法

装置	寸法
センサ端末のサイズ	37mm×46mm×12mm
スマートフォンケースのサイズ[93]	127mm×63mm×11mm
（参考）富士通 Arrows NX F-04G[94]	146mm×70mm×10.5mm（最厚部）



図 4-6 スマートフォンケースにセンサ端末を固定した様子

4.4.2 データセットと実験設定

計測した各被験者の歩行信号にセグメンテーション手法を適用し、各計測回から各センサ各軸 10 周期の認証に使用する準周期信号を取得した。提案手法、比較手法ともに被験者 50 人による実験 1 と同じ認証手法を用いて性能の評価を行っている。

SVM を用いた認証手法では 4-交差検証による評価を行った。より現実的な実験条件設定とするために、3 回の計測から得られた準周期信号は事前に DB に登録されている事前登録信号とし、残りの 1 回の計測信号から得られた準周期信号を評価用の入力信号とした。つまり、学習用の信号と評価用の入力信号の計測回は別にし、同じ計測回の信号が学習と評価用の信号両方に選択されない条件で評価を実施している。

提案手法における複数のテンプレート信号の選出法については、周期の開始時間順に各計測から 2 周期ずつ、合計 6 個のテンプレート信号を選出している。テンプレート信号は各計測における周期の開始時間順に 1 周期ずつ入れ替え、繰り返し評価を実施している。本実験で性能の評価を行った認証手法を以下に示す。

- **提案手法**

- ・ 距離入力 1 (4 次元) による認証
- ・ 距離入力 2 (6 次元) による認証
- ・ 距離入力 3 (7 次元) による認証

- **比較手法**

- ・ 音声認識手法
- ・ 従来研究[81]のテンプレート生成法と距離計算法による認証手法
- ・ DTW 距離と SVM による認証手法 (提案する単一軸信号の計算法未適用)

4.4.3 評価結果

表 4-12 に本実験で使用したデータセットにおける各手法の EER を示す．図 4-8 は提案手法の ROC 曲線を，図 4-8 に提案手法のなかで最も高い認証性能を示した 7 次元の特徴入力と比較手法の ROC 曲線を示す．

提案手法においては 4 次元の特徴ベクトルを入力した場合の EER は 0.3%，6 次元の特徴ベクトルとした場合の EER は 0.5%，7 次元の場合は EER=0.3% であった．一方，比較のために検証した手法は，いずれも本研究で提案する手法と比べて高い EER であった．本研究の提案手法は認証システムとして高い性能を示した．

表 4-12 各認証手法の EER[%]

条件	EER
距離入力 1 (4 次元)	0.3
距離入力 2 (6 次元)	0.5
距離入力 3 (7 次元)	0.2
音声認識手法 (54 次元)	9.7
従来研究手法 (Z 軸角速度信号)	4.9
DTW 距離+SVM (提案計算法未適用)	19.1

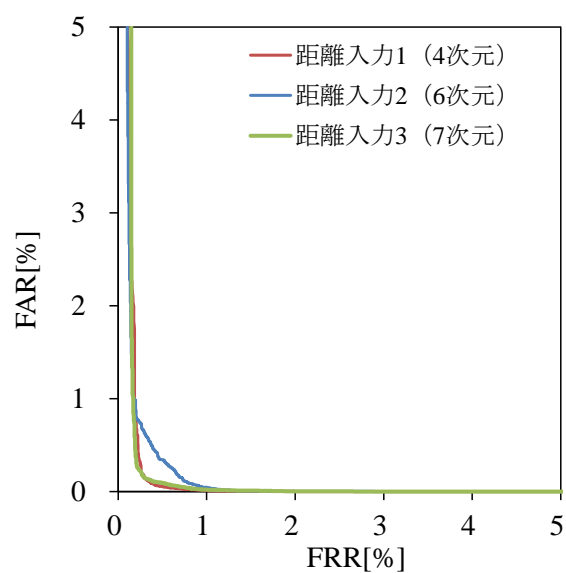


図 4-7 提案手法の ROC 曲線 (0~5%の範囲を表示)

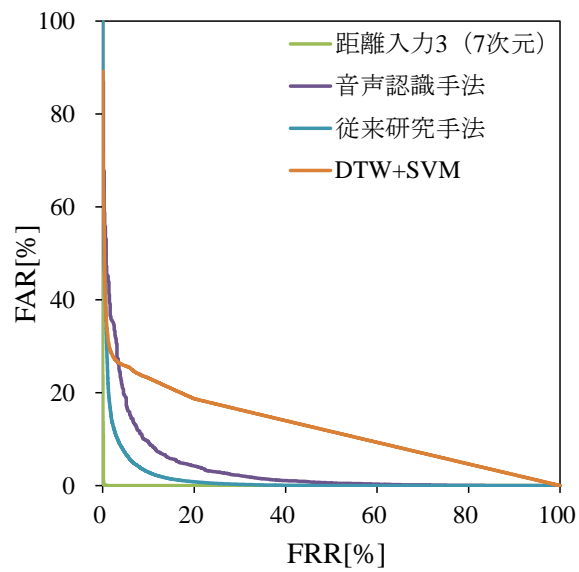


図 4-8 距離入力 3 (7 次元) と比較認証法の ROC 曲線の比較
(上：全体，下：0~30%の範囲を表示)

4.3 まとめと考察

本研究では、SVM を用いて本人／本人以外を判定する手法の認証制度を改善するために、入力信号とテンプレート信号の複数の距離（3 軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離、加速度信号のマンハッタン距離、角速度信号のマンハッタン距離）を特徴量とした。また、信号間の距離を計算する際に、時間領域における認証用信号の抽出手法及びテンプレート信号の複数選出手法を導入した。

提案した認証システムは被験者数 50 人を用いた実験 1-1 では、各被験者計測回数 1 回データセットを用いた。このデータセットはズボンによる信号への影響を取り除いた本人の歩行動作信号による認証精度を検証するために、大腿部（ポケット上部）にセンサ端末を取り付けて収集された。提案する 3 軸加速度ベクトル距離と 3 軸の角速度信号のマンハッタン距離を特徴量とした 4 次元の特徴ベクトルによる認証精度は $EER=0.8\%$ となり、各センサ各軸の信号マンハッタン距離を 6 次元の特徴量とした提案手法 2 の $EER=1.3\%$ よりも高い認証精度を示した。3 軸加速度ベクトルの向きの違いを距離が歩行認証において有効に働くことが示された。更に、3 軸加速度ベクトル距離、3 軸の加速度信号のマンハッタン距離・3 軸の角速度信号のマンハッタン距離を 7 次元の特徴量とした提案手法 3 は $EER=0.6\%$ となり、提案手法の中で最も高い認証精度を示した。

次に本研究の提案手法との比較のために、実験 1-2 では同じデータセットに対して音声認識手法、同じ端末所持位置における従来研究手法、本研究で提案した個別軸信号間距離の最適な計算手法を導入せず、DTW 距離に基づいた SVM による認証手法による精度評価を実施した。それぞれ $EER=6.4\%$, 7.8% , 5.3% となった。本研究の提案手法は、これらの手法と比べて低い EER であることから高い認証精度を示し、ポケットの影響が存在しない本人固有の歩行動作信号をもとに認証を行うという理想的な状態においては、高い精度で人物を識別できることが確認できた。

提案認証手法は、歩行動作やポケットへの端末の出し入れなど、実際の使用環境において生じる端末の所持位置のずれにも対応するためのものである。実験 2 では 17 人の被験者に対して、歩行信号の測定を被験者あたり 4 回行った。この測定では、測定ごとにポケットのセンサ端末の出し入れを行い、実際の使用状況を模擬したデータセットを収集した。また、交差検証を行う際は計測回ごとにデータセットを分割し、訓練データと評価用のデ

一タに同じ計測回由来の信号が含まれないようにした。提案する 3 軸加速度ベクトル角度差による距離と 3 軸角速度距離を特徴量とした距離入力 1 の認証精度は $EER=0.3\%$ となり、各センサ各軸の信号間距離を 6 次元の特徴量とした距離入力 2 の $EER=0.5\%$ よりも高い認証精度を示した。更に 3 軸の加速度・3 軸の角速度・3 軸加速度ベクトル角度差の距離を 7 次元の特徴量とし距離入力 3 の EER は 0.2% と、わずかに向上し、検討した手法の中で最も高い認証精度を示した。これら 2 つの結果から、提案認証システムの有効性だけでなく、3 軸加速度ベクトル距離の歩行認証における有効性も確認できた。

提案手法は、音声認識手法や従来研究手法、本研究で採用した最適な信号間距離計算法を適用しない **DTW** と **SVM** の手法と比べ、高い認証精度を示している。

また、従来研究手法は、その研究の中ではセンサの端末の出し入れをデータセット収集の際に実施している。言い換えるならば、従来研究手法は本実験で検証した端末の所持位置のずれに対応するための手法を提案したと考えられる。この研究におけるテンプレート生成法と距離計算法を本実験のデータセットの角速度 Z 軸に適用した場合が最高認証精度となったが、その EER は 4.9% であった。本研究で提案した距離計算法を導入した認証手法は、この結果と比べて高い認証精度を示しており、従来研究手法と比べて優れた性能を有していると考ええる。

最後に本実験で使用したデータセットについて評価する。付録 D の表 D-8 に実験 1 のデータセットについて単一軸信号を基に評価した結果を示す。また、実験 2 のデータセットについて、単一軸信号を基に評価した結果を付録 E の表 E-2 に示す。これらの結果を比較すると実験 2 は被験者数が約 3 分の 1 であるにも関わらず、 EER が同程度または、低下しているセンサ軸が存在する。このことから、ポケットへの入れ直しによる端末位置の変化は発生しており、計測される歩行信号に影響を与えている。そのため、被験者が 17 人となったにもかかわらず、個別軸の信号を用いた認証では精度が低下したと考えられる。

本研究で提案する認証手法はポケットへの端末の入れ直しが行われたにもかかわらず高い認証精度を保ったことから、入れ直しによるセンサの位置のずれにも対応し、高い認証精度を保つことができたと言える。

提案する三軸角度差を統合した手法は 7 次元の特徴量において端末を装着した被験者数が多い実験、端末の入れ直しを検証した実験、両方において最も高い認証精度を示した。この結果より、歩行認証の精度改善の手法として有効であると考えられる。

第 5 章 結論

本博士論文では、ユーザが意識的に操作すること無く認証を行える個人認証法として、スマートフォンへの導入を目指した「歩行認証」についての研究を行った。歩行認証はユーザの歩行動作を、ユーザ自身が身に付けたセンサを用いて計測し、その動作信号を基に認証を行う認証法である。個人認証法に対してユーザが感じる問題の 1 つである「認証操作の煩わしさ」を解消することを目指し、スマートフォンに実装する歩行認証についての課題の分析を行った。

第 2 章では従来研究について分析を行った。歩行認証の問題の 1 つは、主に腰部に中央または側面にセンサを固定した研究が多くみられる点である。しかしながら、腰部にスマートフォンを所持するケースは日常においては少なく、所持のためには特別な道具が必要になる。これは、ユーザが「煩わしさ」を感じる要因となるため、本研究では腰部に端末を保持して認証を行うのではなく、ズボン前ポケットに端末を所持した状態において認証を行う方式を採用した。

問題の 2 つ目として、実際の利用を考慮した場合に、ズボン前ポケットに所持したセンサを使用した従来研究法の認証精度は、個人認証法として十分な精度を示していないことである。認証精度低下の原因としては、1 センサによる認証精度の限界や、端末の出し入れやポケットにおける弱い端末の拘束力による端末位置のずれが原因であると本研究では推測した。これらの問題点を踏まえて、ポケットに所持したセンサによる認証の高精度化手法について本研究では検討した。

第 3 章では、認証精度を向上させるための手法を提案した。提案認証法は SVM を用いて本人／本人以外を認証する手法の認証精度を改善するために、入力信号とテンプレート信号の複数の距離（3 軸加速度ベクトルの方向の違いによる距離、加速度信号のマンハッタン距離、角速度信号のマンハッタン距離）を特徴量とした。また、信号間の距離を計算する際に、時間領域における認証用信号の抽出手法及びテンプレート信号の複数選出手法を導入した。

距離計算については認証精度向上に寄与させるために、加速度信号は、歩行動作を円運動と単純なモデルとし、センサの位置のずれによって生じる信号の変化を推測した。この

変化は、どの軸についても距離に比例することから、3 軸加速度ベクトルの方向の違いを距離として求める計算法を導入することを提案した。各センサの信号を個別に評価する際には、加速度の変化に対応するために実効値を 1 とする振幅の正規化を適用することを提案した。更に、歩行動作の多様性に適応するために、複数テンプレート信号を使用する手法を導入した。また、連続して計測される信号から、認証に使用する信号を抽出するセグメンテーションの処理は認証精度に大きな影響を与えるため、極大値と DTW を組み合わせたセグメンテーション手法を導入した。

第 4 章では提案手法の評価のために 2 種のデータセットを用いた実験を行った。50 人の被験者から取得したデータセットを使用した実験では、本研究で提案する 3 軸加速度ベクトル間の距離を特徴量とした認証法は高い精度を示し、4 次元の特徴ベクトルでは EER は 0.8% を、7 次元の特徴ベクトルでは EER は 0.6% を示した。これらの認証精度は、音声認識手法や本研究で提案する手法を適用しなかった SVM による認証法よりも高い精度であった。更にポケットにセンサ端末を所持した従来研究のテンプレート生成法と距離計算法を同じデータセットに適用した場合の EER は 7.8% であり、相対的に 92.2% の精度向上を達成した。

17 人の被験者を使用した実験では各被験者 4 回の計測を行い、1 回ごとにポケットから端末の出し入れを行った。本研究で提案する手法は 7 次元の特徴ベクトルにおいて、EER は 0.2% であった。音声認識手法、本研究で提案する手法を適用しない SVM による認証法、従来研究のテンプレート生成法と距離計算法による EER よりも低い値となり、実際の使用に近づけたデータセットにおいても本研究の認証法は従来の認証手法と比べて高い認証性能を示した。

データセットは異なるため比較は難しいが、表 2-1 に示す過去の研究と比べても、同程度の被験者を使用した研究と比べて、本研究で提案した手法は非常に高い認証精度を達成することができた。以上の結果から、歩行認証における問題点の解決に寄与する手法の提案と、その有効性の確認ができたと考える。

本研究においては、経年による歩行動作の変化や、ポケットに入れた際の端末の向きの違い、衣服や靴の違い、路面の状態の違いなど、検証していない条件は様々存在している。現在の結果は最終結果ではなく、今後、そのような実際の利用における状況を考慮したデータの収集を行い、認証精度の検証を行う必要がある。本研究で得られた認証手法を基に、経年変化であればテンプレートの入れ替えを行うといった手法を追加することで、より現実 に即した条件下であっても歩行認証の高精度化は達成可能であると考ええる。

謝辞

本論文は筆者が公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科システム情報科学専攻博士後期課程に在学中の研究成果をまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの皆様に御指導を賜りました。

論文を審査してくださいました公立はこだて未来大学システム情報科学部教授 佐藤仁樹先生、同教授 藤野雄一先生、同准教授 白石陽先生に感謝を申し上げます。佐藤先生には研究内容について貴重な知見をいただき、論文としてまとめるにあたり多くの御助言、御指導を賜りました。佐藤先生から賜りました御指導、御助言を、今後の教育活動に活かしていきたいと考えております。多くの御指導を賜りましたことに、心より感謝を申し上げます。藤野先生には、論文の全体について精査をしていただき、御指導を賜りました。博士論文について、多くのコメントや修正必要箇所の御指摘をいただき、御指導を賜りました。心より感謝を申し上げます。白石先生にはこの研究の開始当初から多くの御助言、御指導を賜りました。論文を投稿する際など、多くの御指導を賜りましたことで、研究として進めることが出来ました。心より感謝を申し上げます。

システム情報科学部教授 高橋修先生には、研究を始める機会をいただき、本研究の全面にわたりまして多大なる御指導・御助言を賜りました。論文としてまとめること、研究成果として発表することについて、多くの御助言をいただくとともに、遅々として進まない研究状況でしたが、高橋先生から激励をいただくことで、何とか現在の状況までたどり着くことが出来ました。この研究を通して、バイオメトリクスを中心とした情報工学の様々な分野についての知見を得ることができたと感じております。今後の高専における教育活動を行う上で、これまで以上に深く学生に対して指導ができると感じております。心より感謝しております。この場をお借りしましてお礼を申し上げます。

システム情報科学部助教 中村嘉隆先生にも多くの御指導をいただきました。夜遅い時間帯やお忙しい時間にも研究のレビューをしてくださいました。また、研究の直接的な内容だけでなく、研究に関わる多方面の事柄について御指導・御助言を賜りました。心より感

謝を申し上げます。

函館工業高等専門学校生産システム工学科教授 藤原孝洋先生，同教授 太刀川寛先生，同准教授 後藤等先生にも研究について多くの相談させていただき，様々なアドバイスを賜りました．心より感謝を申し上げます．

函館工業高等専門学校専攻科生産システム工学専攻の古館裕大学生にも感謝いたします．古館学生との議論を通して，研究内容について深く考える機会をいただきました．心より感謝を申し上げます．

実験に快く協力してくれた多くの函館工業高等専門学校の学生の皆さんにも感謝いたします．面倒な計測に協力してもらい，貴重な歩行動作のデータを提供いただきました．皆さんの協力が無ければ，研究を進めることができませんでした．どうもありがとうございました．

大学院入学について背中を押してくれた家族と両親に感謝します．研究のため不在になることが多く，家族に対しては様々な面で迷惑や苦勞をかけました．両親については，私が家族の面倒を見られないため，代わりにサポートをしてもらいました．家族と両親の協力があったこそ，この段階まで辿り着くことができたと感じています．有難うございました．

最後に，公立はこだて未来大学に感謝いたします．もしも函館に大学がなければ，このような研究活動に積極的に係ることは無かったと思います．この研究を通して，これまでの社会人生活には存在しなかった様々な事柄を経験することができました．この活動を通して経験したこと，得ることができた知識を，今後の教育活動に有効に活用したいと考えております．ありがとうございました．

付録 A 端末所持部位の違いによる認証精度の比較

歩行動作による個人認証方法を研究するにあたり，本研究で考える最適な携帯端末の所持部位であるズボンポケットの認証精度について検証を行う．ズボンポケットにおける認証精度が，先行研究で多く採用される端末所持部位ある「腰」と比較して著しく低い場合は，高精度化という目的を達には困難を極める．「ズボン前ポケット」における歩行認証と，従来の歩行認証の研究で多く選択されてきた部位である「腰」における歩行認証の精度を検証することで，ズボンポケットにおける歩行認証の実現可能性について検証する．

A.1 歩行信号の計測と分析

本章では，端末を「腰」に所持した場合と，「ズボン前ポケット」に所持した場合について歩行時の信号を測定する．本実験の目的は，ズボン前ポケットにおける認証と腰部での計測における認証を比較し，ズボンポケットでの歩行認証の実現可能性を検証することである．したがって，実際の利用状況下ではなく，理想的な状態におけるそれぞれの部位の認証性能を検証することとした．

歩行信号の測定

測定条件を表 A-1 に示す．被験者数は 15 人である．センサのサンプリング周波数は一般的なスマートフォンのセンサ性能の約 10 倍である 1000Hz とし，歩行動作によって生じる歩行信号を精細に計測できるようにした．

また，本研究ではセンサ端末を被験者自身のズボンポケットではなく，小型のポシェットを使用して各部位に装着した．身に付けているズボンの違いに起因するポケットの形状や位置の違いは，実際の利用を考慮した場合に精度の低下を招く一因になると考えられる．しかし，本研究の多くの実験では各被験者における歩行動作の計測回数は 1 回である．歩行信号の個人差が小さいと仮定した場合，ポケットの違いにより信号が変化し，逆に個人の区別が容易になる可能性も考えられる．被験者が身に付けているズボンのポケットの違いが識別結果に影響を与えることを防ぐために，全ての被験者はズボンのポケットではな

く、同じ器具を使用してセンサを装着する必要があると考えた。そこで本実験では被験者のポケットにセンサを保持させることをせず、ポケットの上部にポシェットを固定し、その中にセンサを保持させることとした。

センサの装着の状況を図 A-1 に示す。加速度及び角速度センサは、各々3 軸について測定可能であり、センサの X 軸は直立時に鉛直下向きに、Y 軸は胴体側方に、Z 軸は大腿部後方とした。腰部においては、X 軸は直立時に鉛直下向きに、Y 軸は体の後方に、Z 軸は胴体の側方外側とした。

測定コースは、平坦な屋内のほぼ直線状の廊下とし、既定のコースを歩き終わるまで測定を行った。測定コースの写真を図 A-2 に示す。カーブが存在するが、被験者が緩やかに方向を変えて歩行することで、まっすぐ歩けることから、測定コースとして問題ないと判断した。測定時間は各被験者で多少の違いがあるが、約 70 秒間であった。被験者は約 5 秒静止してから歩きはじめ、歩き終わったら約 5 秒静止してから計測を終了した。歩行速度やタイミングを計るための装置は一切使用せず、被験者には日常の「普通」と思われる歩行速度と動作で歩くように指示をして計測を実施した。

表 A-1 測定条件

条件	設定値
被験者数	15 人
年齢	18～32 歳
使用センサ	TSND 121（加速度・角速度センサ）
サンプリング周波数	1000Hz
センサ保持位置	(a)左脚大腿上部、(b)腰部左側面
測定コース	函館工業高等専門学校 1F 廊下
計測時間	約 70 秒×2 回（各装着部位 1 回計測）

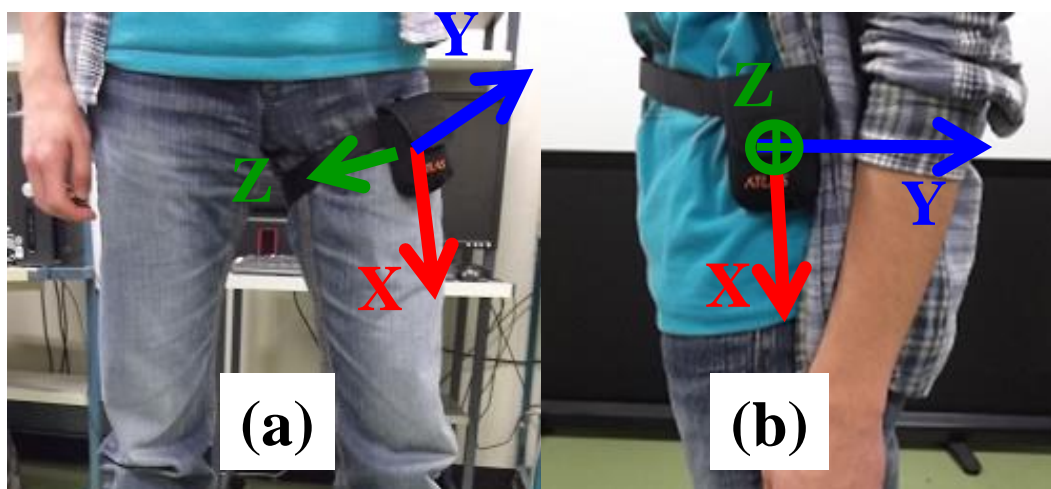


図 A-1 センサ装着の様子，(a)ズボン左前ポケット，(b)左腰側面

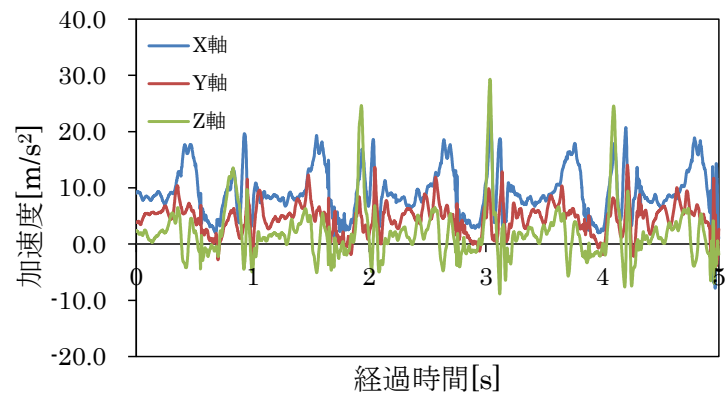


図 A-2 測定コース（函館高専1階廊下）

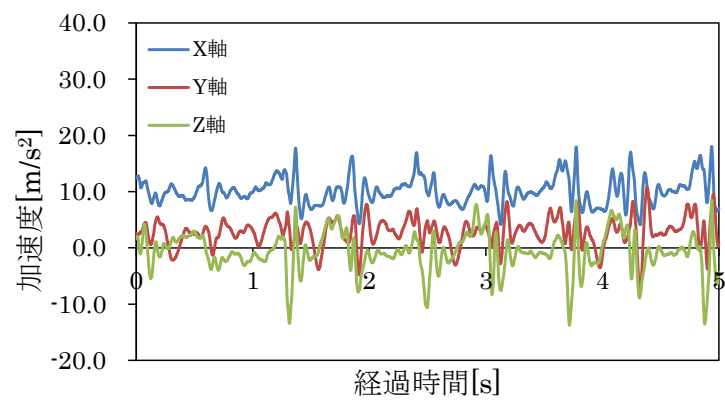
測定信号の分析

同一人物の左脚大腿部に装着したセンサにおいて、計測した歩行時の加速度信号を図 A-3 に、角速度信号を図 A-4 に示す。歩行時には加速度と角速度両センサにおいて、類似の信号が繰り返し測定されることが観察される。このことから、あらかじめ登録していた本人のテンプレート信号と、入力された信号を比較して信号間距離を求め、その距離を基に認証を行うことでテンプレート信号と入力信号が同一人物のものであるのか、判定が可能と考えられる。

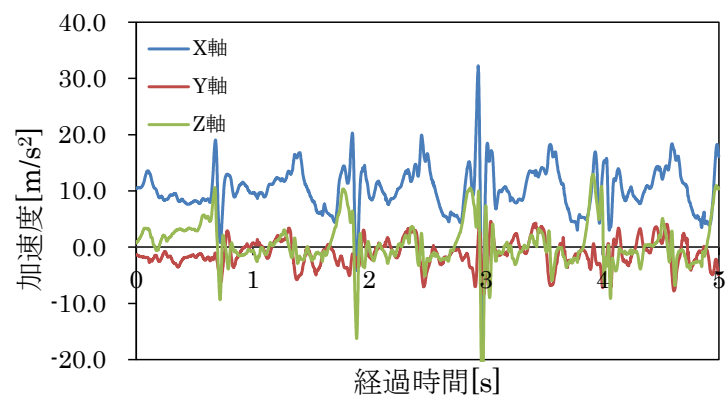
歩行認証に必要な入力信号の長さについては、ユーザが感じる歩行認証における簡便さを考慮する必要がある。長時間の歩行信号を用いる認証方式である場合、認証の判断を繰り返し、その結果について多数決などを最終的な認証結果とすることで精度を向上する手法が可能となるが、実際の使用を考えた場合に長い距離を歩く必要があり、認証システムとしては不便が生じる。認証に使用する信号は極力、短時間の信号であることが望ましい。ズボンポケットにセンサを保持した場合、センサは、端末を保持している脚を振る動作によって生じる信号、両脚が接地している期間の信号、端末を保持していない反対側の脚を振る動作によって生じる信号を観測することになる。いずれの期間の信号にも個人の特徴があるという仮説のもと、認証に用いる信号は 2 歩を 1 周期の信号として認証に用いる方式を採用した。



被験者 A

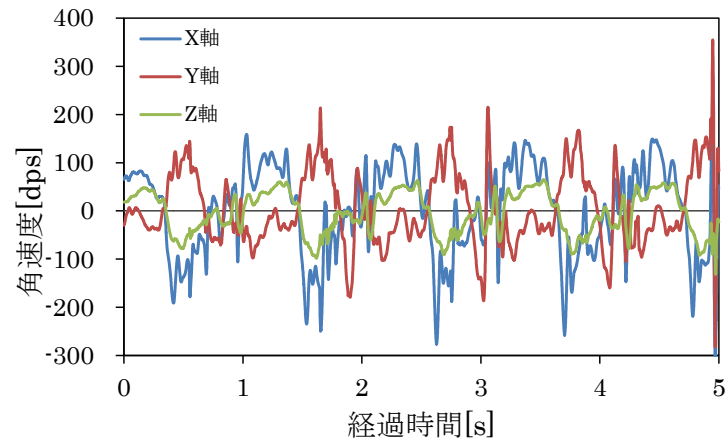


被験者 B

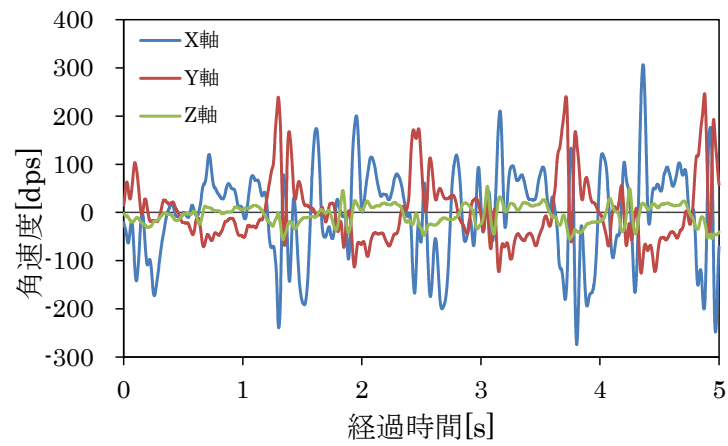


被験者 C

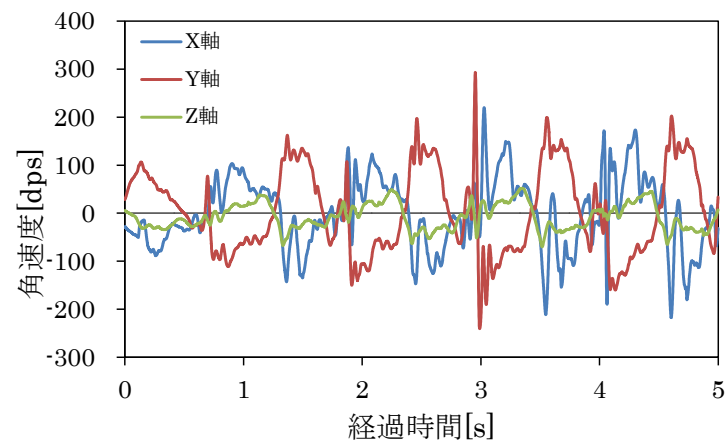
図 A-3 歩行時に測定された 3 名の被験者の加速度信号
(上) 被験者 A, (中) 被験者 B, (下) 被験者 C



被験者 A



被験者 B



被験者 C

図 A-4 歩行時に測定された 3 名の被験者の加速度信号
(上) 被験者 A, (中) 被験者 B, (下) 被験者 C

A.2 認証用信号の抽出法

加速度信号は左右 2 歩分の信号を繰り返し発生する準周期信号となっている．認証システムとして確立するためには，一定のルールに従って，認証に用いる準周期信号にセグメンテーションを実現する必要がある．この予備実験では正規化相互相関を利用し，以下の手法でセグメンテーションの処理を適用し，2 歩 1 周期の準周期信号へ分離した．

- (1) 測定信号中において，鉛直加速度が最大値となる時刻 t_n を求める．
- (2) t_n から t_{len} 時間後を中心とした t_s 時間内にある極大値の時間を全て求める．（図 A-5）
- (3) 最大値を中心とした t_w 時間内の信号部分と，各極大値を中心とした t_w 時間内の信号部分の正規化相互相関を求め，最大値となる時刻を新たな準周期信号の始点 t_{n+1} とする．
（A-6）
- (4) 次の始点 t_{n+1} から(2)～(3)の処理を行い， t_n 以降の全ての始点を順に求める．
- (5) t_n 以前の始点についても， t_{len} を始点から引き，(3)を適用して順に求める．
- (6) 鉛直加速度から取得した各準周期信号の開始時刻で，残る加速度 2 軸及び 3 軸角速度の信号も分離し，各軸の準周期信号を得る．

この方法の適用により分離・抽出された被験者 A の各準周期信号を図 A-7 ～ 12 に示す．非常に類似性は高いが，信号の長さ（周期）や対応する時刻の各振幅に違いが存在することが観察できる．被験者 A・B・C の準周期信号を比較したものを図 A-13 ～ 18 に示す．同一人物の準周期信号を比較した場合と比べると，その類似度が低いことが観察できる．

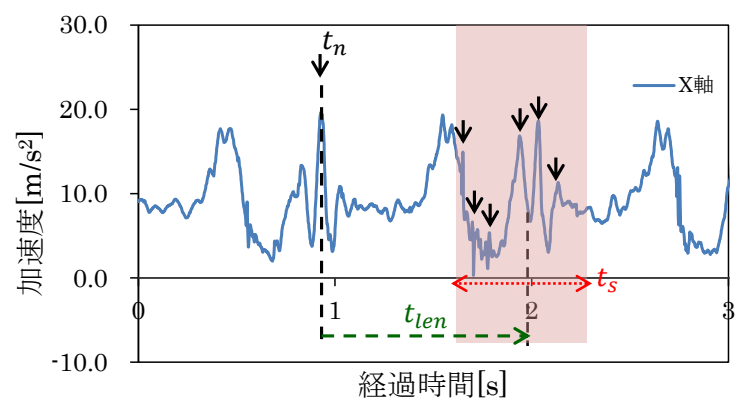


図 A-5 準周期信号抽出手順(2)

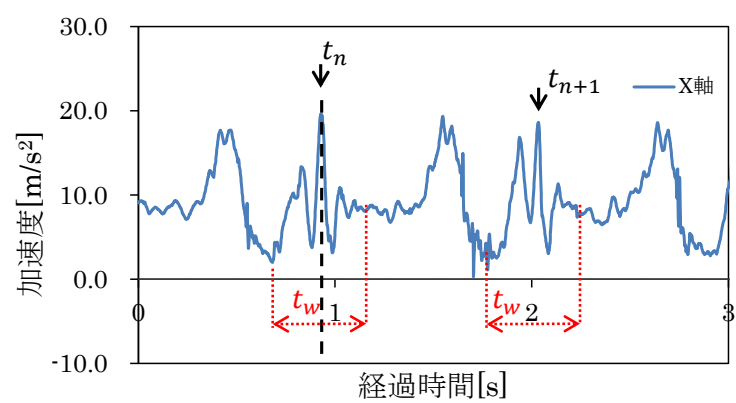


図 A-6 準周期信号抽出手順(3)

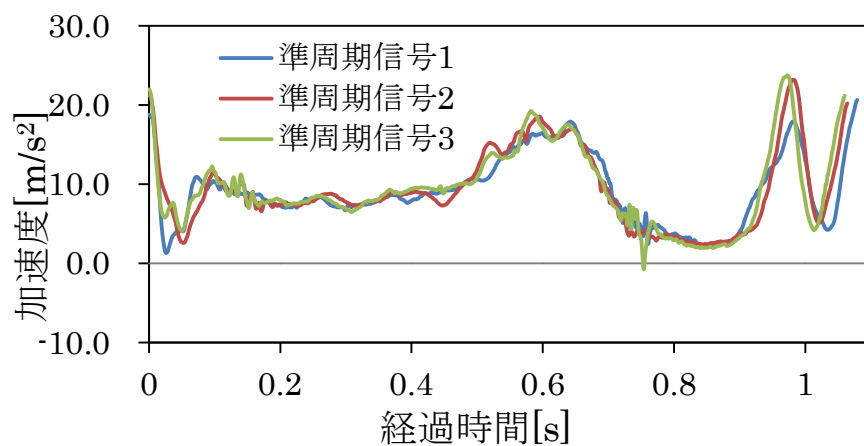


図 A-7 被験者 A の抽出された X 軸加速度準周期信号

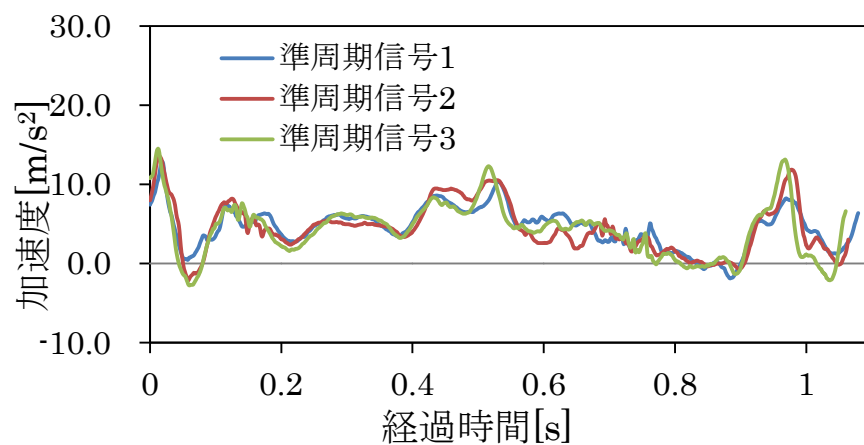


図 A-8 被験者 A の抽出された Y 軸加速度準周期信号

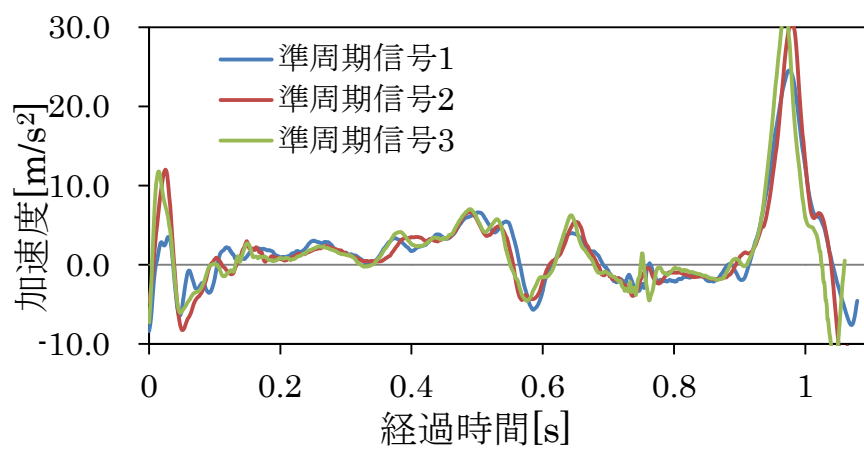


図 A-9 被験者 A の抽出された Z 軸加速度準周期信号

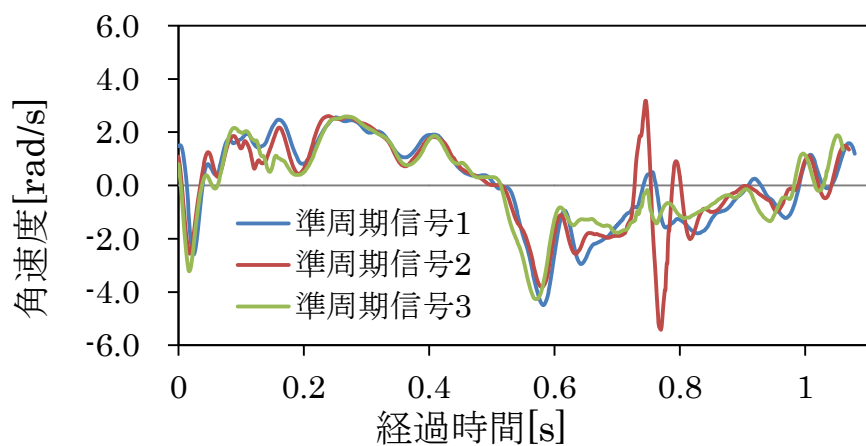


図 A-10 被験者 A の抽出された X 軸角速度準周期信号

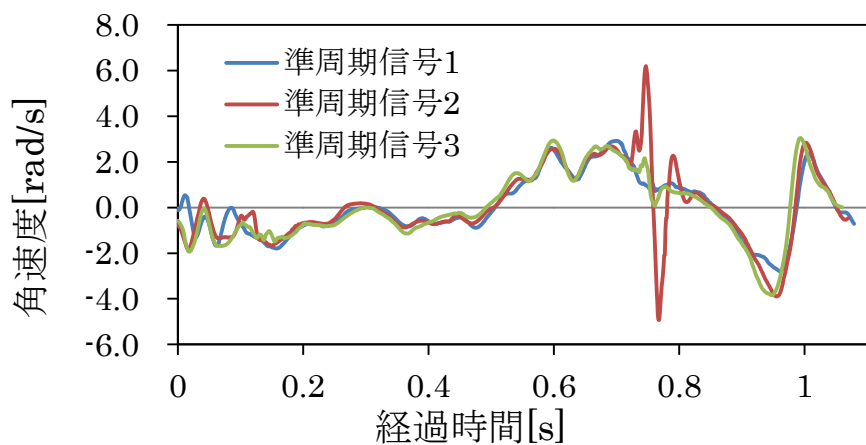


図 A-11 被験者 A の抽出された Y 軸角速度準周期信号

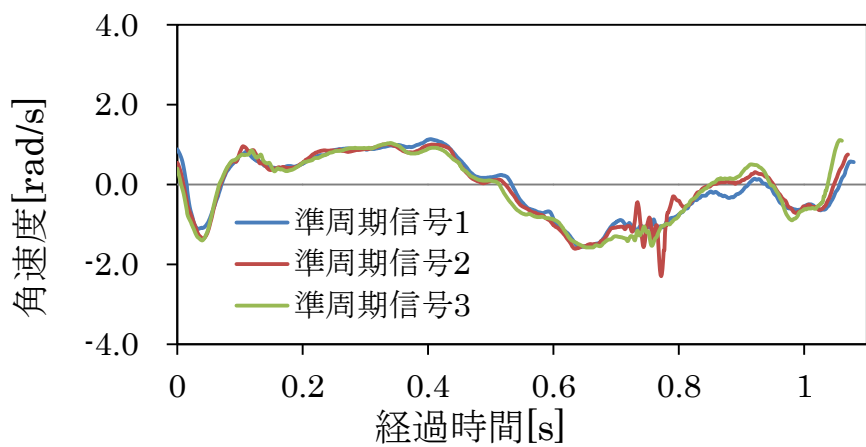


図 A-12 被験者 A の抽出された Z 軸角速度準周期信号

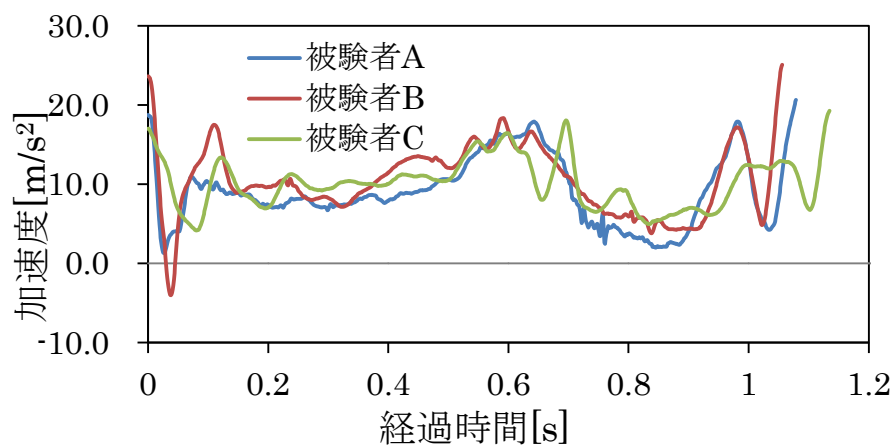


図 A-13 被験者 A, B, C の抽出された X 軸加速度準周期信号

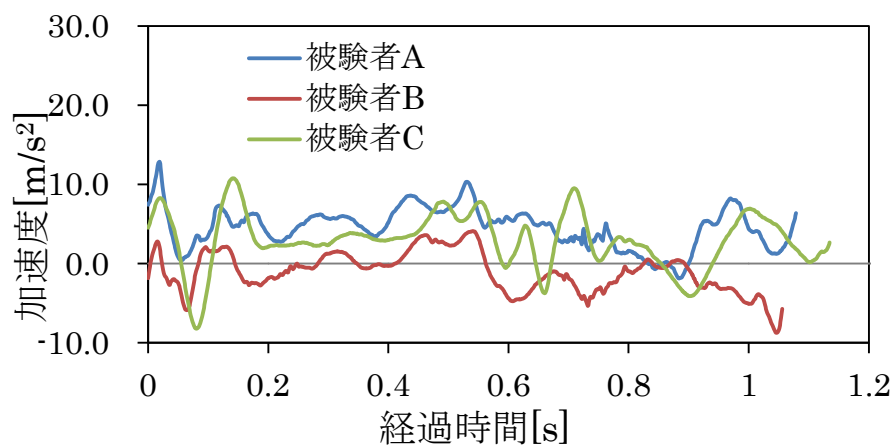


図 A-14 被験者 A, B, C の抽出された Y 軸加速度準周期信号

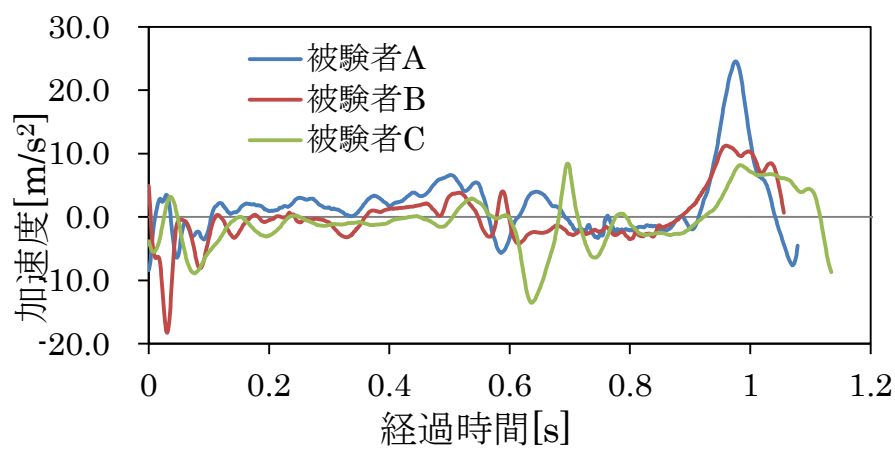


図 A-15 被験者 A, B, C の抽出された Z 軸加速度準周期信号

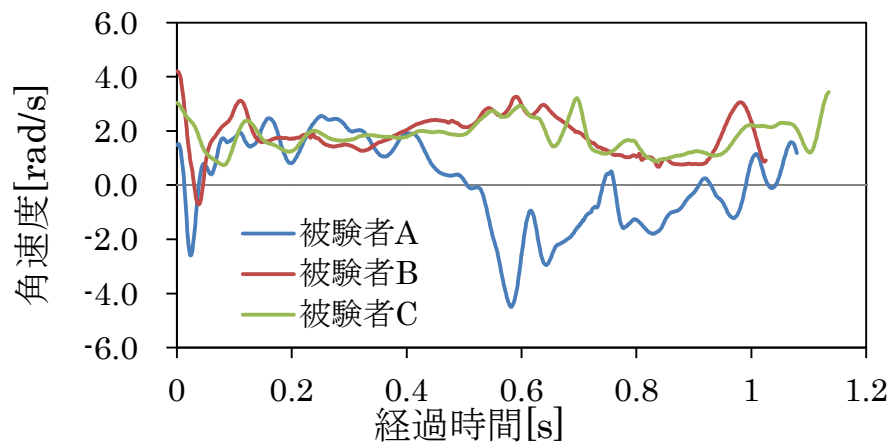


図 A-16 被験者 A, B, C の抽出された X 軸角速度準周期信号

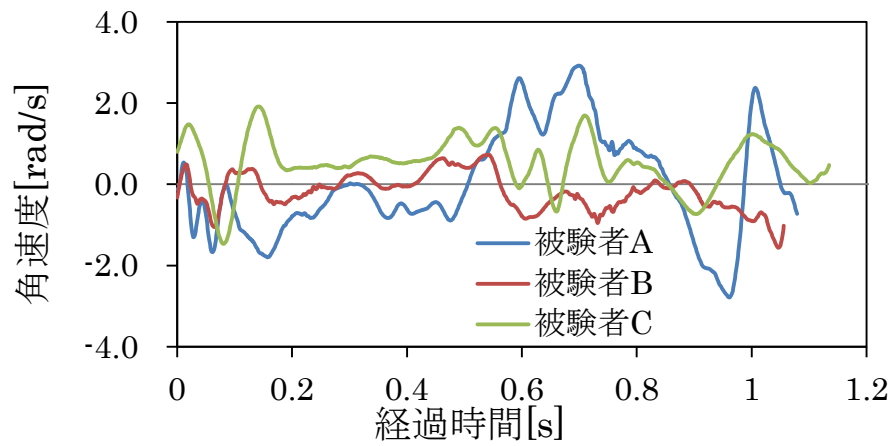


図 A-17 被験者 A, B, C の抽出された Y 軸角速度準周期信号

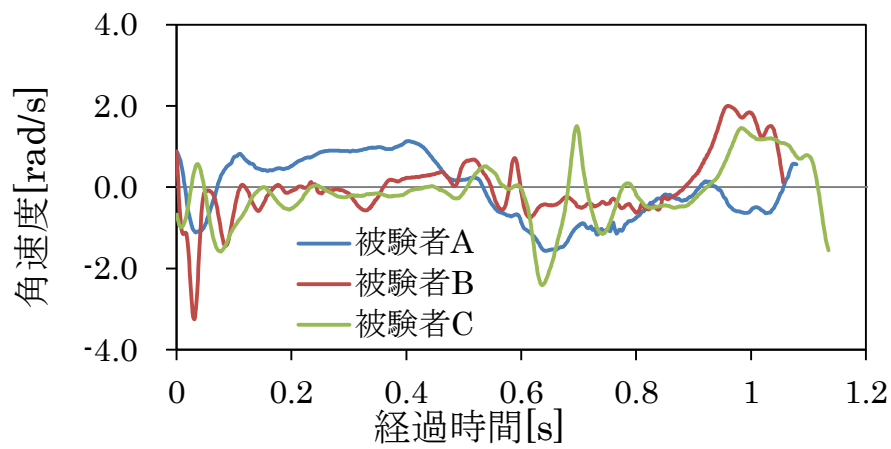


図 A-18 被験者 A, B, C の抽出された Z 軸角速度準周期信号

A.3 認証方法

認証方法の概要

前節で示した通り，各軸で測定される歩行信号は同一人物では類似性が高く，異なる人物間では，その類似性は低くなる．この性質を利用して，一般的なバイオメトリクス認証システムと同様に事前に登録されたテンプレート信号と，認証を試みる入力信号との間の類似性を基に認証を行う．認証の流れを図 A-19 に示す．本研究では，まず 2 つの信号の振幅の正規化を行った後，信号間距離を求める．振幅の正規化方法は以下となる．

- **振幅正規化なし**

計測された信号の振幅値をそのまま認証に使用する．従来研究において，この手法を採用する研究は多く存在する．

- **MAX**

その信号の振幅絶対値の最大値で各振幅を割ることで，各信号の振幅絶対値最大値を 1 の信号に正規化する操作となる．

- **PP (Peak to Peak)**

最大値と最小値の差を 1 とすることから，その信号の振幅最大値・最小値両方を考慮した正規化を施すことができる．

- **RMS (Root Mean Square)**

RMS は信号の強さを表す目的で使用される値であり，電力においては実効値と呼ばれる．信号の持つパワーの平方根であり，直流成分でその信号の持つ強度を表したものである．この値で準周期信号の各振幅を割ることで，各準周期信号の強度（実効値）を 1 に正規化した信号として，距離計算を行うことができる

信号の類似性から同一人物の信号間距離は小さく，異なる人物間には大きな距離が計算されると予測される．この信号間距離を基にテンプレート信号の人物（認証を許可された人物）と同一人物であるかを閾値 D_{th} により，以下の様に判定する．

- (1) 計算した距離 $\leq D_{th}$ → 同一人物のものであると判定して認証を受け入れる
- (2) 計算した距離 $> D_{th}$ → 異なる人物のものであると判定して認証を拒否する

本実験では，信号間距離計算法は，ズボンポケットに端末を所持して歩行認証の精度を報告していた先行研究[85]において最高精度を報告していた「マンハッタン距離」と，本研究で提案する「3 軸加速度角度ベクトルの方向の差」を評価した．長さの異なる 2 つの信号の整合方法としては DTW を採用した．

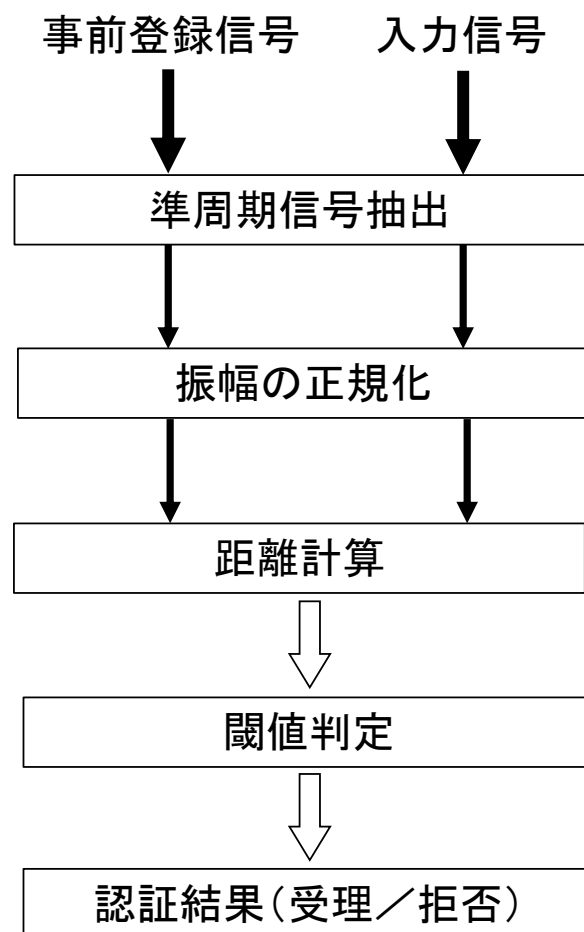


図 A-19 本章実験における認証の流れ

A.4 実験

実験方法

本研究で提案するズボンポケットに所持したセンサ測定信号に基づいた歩行認証が実現可能であるかを検証するために、実験を行った。両部位のセンサ計測信号から EER を求めて、その値からズボン前ポケットによる歩行認証の実現可能性を検証する。本実験で使用するデータセットは A.1 で計測した信号に、A.2 のセグメンテーション用のアルゴリズムを適用して抽出した準周期信号である。評価に使用したデータセット及び認証実験における距離計算設定条件について表 A-2 に示す。

被験者の 30 周期の準周期信号を 1 つ選びテンプレート信号とし、残り 29 周期の準周期信号を評価用の本人信号とする。また他の被験者の全ての準周期信号を評価用の他人信号とした。全ての被験者の全ての準周期信号をテンプレート信号として選ばれるものとして、認証精度の評価を行った。

表 A-2 データセットと認証法

条件	設定値
被験者数	15 人
センサ各軸の準周期信号数	30 周期／人
信号の整合方法	DTW
距離計算法	マンハッタン距離
GAP ペナルティ	あり／なし の 2 通り

実験結果

加速度センサ単一軸の信号による認証法の EER を表 A-3 に、提案する 3 軸加速度角度差による認証法の EER を表 A-4 に、角速度センサ単一軸の信号による認証法の EER を表 A-5 に示す。太字は、それぞれの部位のセンサ各軸、または 3 軸加速度角度差において最も精度の高かったものを示す。

表 A-3 加速度センサによる EER[%]

部位	GP	軸	正規化なし	MAX	PP	RMS
左脚	あり	X	7.8	13.7	17.9	5.9
		Y	4.9	8.6	7.4	3.9
		Z	6.8	9.5	7.5	4.0
		平均	6.5	10.6	10.9	4.6
	なし	X	12.6	16.6	19.5	11.1
		Y	6.8	9.8	8.7	6.7
		Z	8.9	10.2	8.8	5.8
		平均	9.4	12.2	12.3	7.9
左腰	あり	X	7.1	11.3	16.0	6.4
		Y	5.3	7.3	4.5	3.5
		Z	3.8	4.3	7.6	5.7
		平均	5.4	7.6	9.4	5.2
	なし	X	12.1	17.3	22.5	12.1
		Y	6.7	9.0	6.9	6.3
		Z	6.6	7.7	7.4	9.2
		平均	8.5	11.3	12.3	9.2

表 A-4 3 軸加速度角度差による EER[%]

部位	GP	EER
左脚	あり	2.3
	なし	2.6
左腰	あり	2.9
	なし	5.1

表 A-5 角速度センサによる EER[%]

部位	GP	軸	正規化なし	MAX	PP	RMS
左脚	あり	X	10.2	5.2	4.4	6.1
		Y	11.9	7.7	6.2	6.9
		Z	9.4	7.0	5.2	8.5
		平均	10.5	6.6	5.3	7.2
	なし	X	12.8	9.7	9.0	10.4
		Y	13.5	9.9	8.7	8.4
		Z	11.3	11.4	9.2	11.4
		平均	12.5	10.3	9.0	10.1
左腰	あり	X	13.4	9.5	7.9	7.0
		Y	8.8	8.5	7.5	6.4
		Z	10.0	6.3	5.3	4.0
		平均	10.7	8.1	6.9	5.8
	なし	X	13.6	12.9	12.2	12.1
		Y	11.1	11.6	11.0	10.0
		Z	11.1	10.2	9.2	9.1
		平均	11.9	11.6	10.8	10.4

A.5 まとめ

本実験は、これまでの歩行認証で使用されることが多かったセンサ装着部位である腰と比較することにより、ズボン前ポケットに所持したセンサによる個人認証法高精度化の実現の可能性を検証した。

加速度センサについては、単一軸の信号を用いた左脚での認証において、全ての軸において腰部と殆ど変わらない認証精度を示した。左脚における最高精度は $EER=3.9\%$ であった。左腰における最高精度は $EER=3.5\%$ であった。また、DTW における GP については、「あり」の方が高い精度となる傾向を示した。また、三軸加速度角度差については、単一軸による認証よりも高い認証精度 ($EER=2.3\%$) を示した。

角速度センサ測定信号を用いた認証についても、左腰部と左脚は同程度の認証精度を示した。左腰部における最高精度は $EER=4.0\%$ であり、左脚における最高精度は $EER=4.4\%$ であった。

本実験の結果から、ズボン前ポケットにセンサを所持した場合においても、著しく認証精度が悪化することなく、腰部にセンサを装着した手法と同程度の認証精度が得られることが判明した。このことから、ユーザの端末所持負担を考慮した所持法として、ズボン前ポケットによる所持は、歩行認証高精度化実現の可能性が存在することが示された。

付録 B 同一歩行動作区間における信号抽出のための予備実験

本研究では極大値を基に認証用信号を抽出するアルゴリズムを提案したが、ズボンポケットセンサで測定したX軸加速度最大値がどのような行動をした際に生じるかは検証されていない。したがって、被験者ごとに異なる行動の区間の信号を抽出した可能性も存在する。この様な場合、被験者ごとに動作が異なるために信号波形も異なり、見かけ上、良好な認証精度となった可能性も存在する。加速度信号と歩行動作の関係を検証した。

B.1 歩行周期

人間の一連の歩行動作である歩行周期は両脚支持期（Double limb Support）と単脚支持期（Single limb Support）から構成される。図 B-1 に歩行動作と各動作期間を図示したものを示す。歩行動作は以下のイベント（離地・接地）を繰り返す。

RHC（右足踵接地）→LTO（左足爪先離地）→LHC（左足踵接地）→RTO（右足爪先離地）→RHC（右足踵接地）→…

被験者ごとに準周期信号の抽出開始時期が異なると、その準周期信号内で実行される歩行動作の順番も被験者ごとに異なったものとなる。加速度信号と歩行中のイベントとの関係は、リハビリなどに活用される理由から、健常者や障害者の腰部中央にセンサを装着したて計測した調査が存在している[95]。また、健常者に腰や下腿にセンサを装着した場合の研究が存在している[96]。しかしながら、ポケットにセンサを装着し、通常で歩行した場合の調査は、その特殊性から存在していない。そこで本研究は、ポケットの位置で観測される歩行信号と、各イベントのタイミングを観測する実験を実施した。

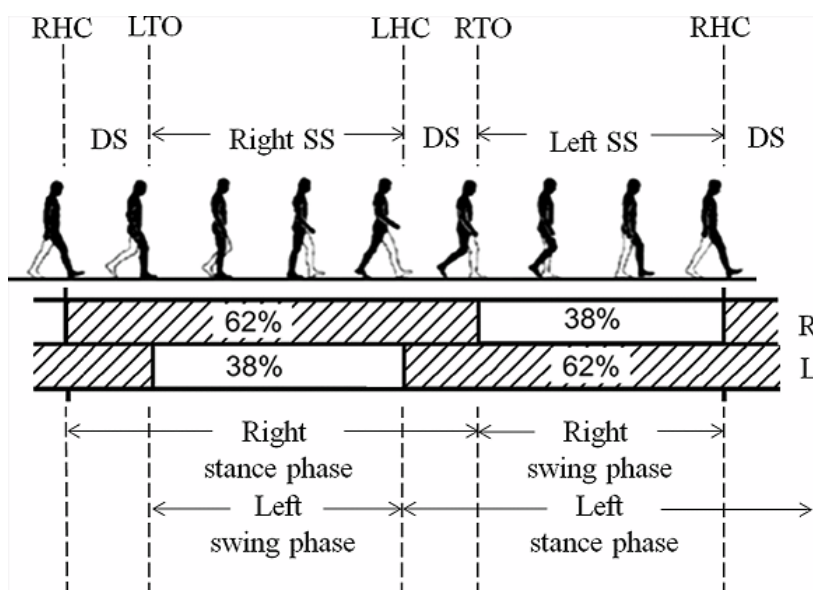


図 B-1 歩行のフェーズ[97]

B.2 歩行動作の測定方法

被験者の左足の裏に力センサ（FlexiForce A201-100，ニッタ）を取り付けた．取り付けた個所は左足の親指及び踵である．これにより，各箇所の接地と離地の時間を，観測される力から検出することが可能となる．このセンサは，左脚ポケット上部に取り付けたセンサユニットと同期して測定を行えるようになっている．測定条件を表 B-1 に示す．力センサを装着した状態を図 B-2 に示す．

表 B-1 測定条件

条件	設定値
センサユニット	TSND121
力センサ	FlexiForce A201-100
センサユニット・力センサ装着脚	左脚大腿部，左足裏（踵，親指）
サンプリング周波数	1000Hz
歩行コース	直線状の屋内フロア
歩行速度	通常で歩く様に指示

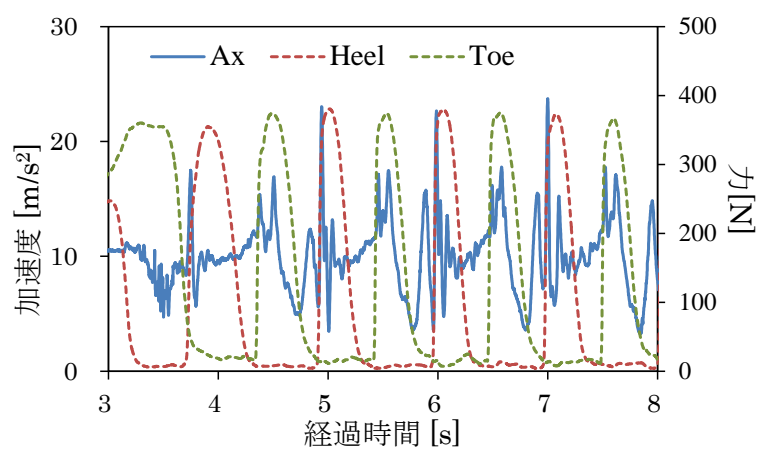


図 B-2 2 個の力センサを装着した様子

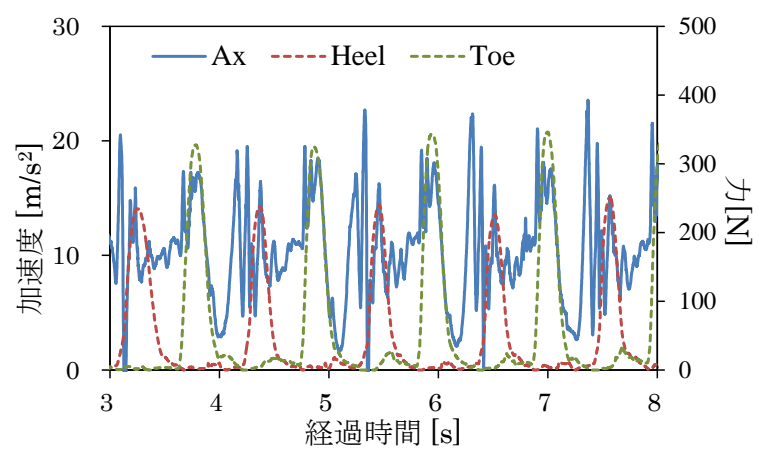
B.3 測定結果と歩行動作の分析

図 B-3 に 3 名分の被験者の X 軸（鉛直下向き）加速度・踵にかかる力（Heel）・親指にかかる力（Toe）を測定した結果を示す．全ての被験者に共通して、「Heel の値が増加開始時刻」「準周期信号の最大値となる時刻」がほぼ一致していることが観察された．その部位が接地によすることにより，力センサは値を検出する．つまり，かかとが接地を開始する時刻は，ポケットの位置で測定される鉛直加速度準周期信号が最大値となる時刻と一致していることが判明した．

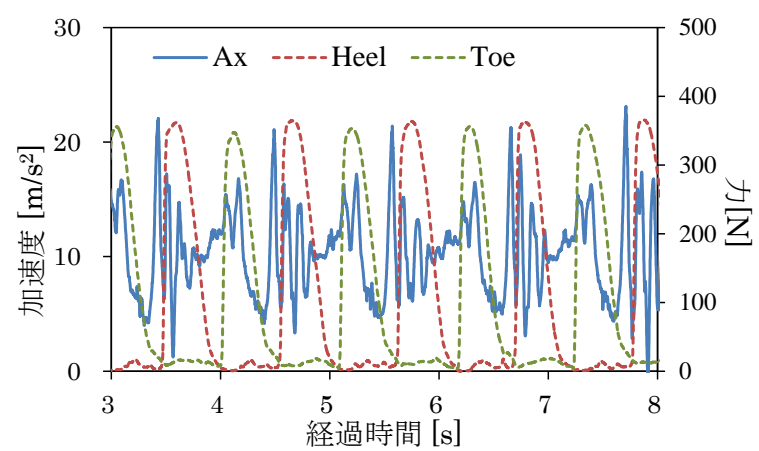
この観察結果に基づいて，準周期信号の最大値から次の最大値までを抽出することにより，どの被験者の場合も共通の動作区間（左足の踵接地から次の左足の踵接地まで）の信号を抽出可能であると予測される．この知見に基づき，セグメンテーションを行うプログラムを開発した．本研究で採用したセグメンテーションのアルゴリズムについては，付録 C において記述した．



被験者 A



被験者 B



被験者 C

図 B-3 3名の被験者の測定信号

付録 C 本研究で採用した歩行動作信号のセグメンテーション手法

C.1 信号の平滑化

セグメンテーションを行う前に計測された加速度及び角速度信号に対して、端末の振動など、ユーザの本来の歩行動作信号ではないノイズを軽減する。3.3.1 で解説した 2 次 3 次式当てはめによるフィルタを適用した。信号が平滑化されることから、ノイズによって生じた極大値を除くことができる。

C.2 準周期信号の抽出

先行研究の歩行開始時間を検出するために閾値を用いる手法[81]と、逐次、準周期を検出する手法[76]に、行動推定に用いられる分散[98]と DTW を導入することで、準周期信号へ信号を分離し、取得する手法を適用した。セグメンテーションの手順を以下に示す。

- 1) 鉛直方向の加速度を監視し、閾値 1.2G を越える事によって、自動で以下の分離を開始する。
- 2) 閾値を越えた時間 t_s から、極大値抽出範囲の振幅最大値を準周期に分離をするための最初の歩行信号 C_0 の開始時間 T_0 とする。
- 3) 次の準周期信号の開始時間 T_1 を、0.7~1.3 秒後にある極大値全てを候補とし、各極大値の時間 $\{t_{11}, t_{12}, \dots\}$ を中心とした 0.6 秒間の部分信号を抽出する。(図 C-1)
- 4) 2)の各部分信号と、 T_1 を中心とした 0.6 秒間の部分信号との間で正規化相互相関を計算する。この値が最大の極大値を次の周期開始時間 T_1 として選出する。この処理により、 C_0 の開始時間と終了時間を得ることが可能となる。
- 5) 次の周期の開始時間 T_1 から 0.7~1.3 秒後に存在する各極大値の時間 $\{t_{21}, t_{22}, \dots\}$ までの部分信号を全て取得する。4)で求めた準周期信号 C_0 と部分信号との間で DTW による距離計算を行う。最小となった部分信号の極大値の時間を、次の周期の開始時間 T_2 とした。距離については、DTW とマンハッタン距離の組み合わせで計算し、2 つの信号の長さ合計で距離を除算して、正規化した距離を比較した。(図 C-2)

- 6) 5)の極大値抽出と、直前の準周期信号との間でDTWによる距離計算を繰り返すことで、全ての準周期信号の抽出を行った。
- 7) 6)を2)で求めた最大値から、時間を戻る信号についても繰り返し行う。
- 8) 歩きはじめの最初の2歩は、分散が閾値を超える傾向が観察された。そこで歩行動作が開始された最初の2歩分の準周期信号を、分散が閾値を超えた信号とする。
- 9) 最初の準周期信号の信号波形が、他の準周期号と比較して歪みが大きいことが観察された。そこで、最初の2歩は認証のデータから除外することにし、それに続く、次の準周期信号から認証に利用するとしてデータセットを収集した。

この鉛直方向の加速度信号と分散との関係を示したある被験者の例を図 C-3 に示す。この信号の場合、約 2 秒から開始される準周期信号及び、それ以降に続く準周期信号を認証に使用するデータとして採用する。得られた周期開始時間で他の軸、他のセンサの計測信号も分離し、開始時間及び終了時間が対応する計 6 種の信号を取得した。

各パラメータについては実験的に試行を繰り返すことで設定した。表 C-1 に示す。

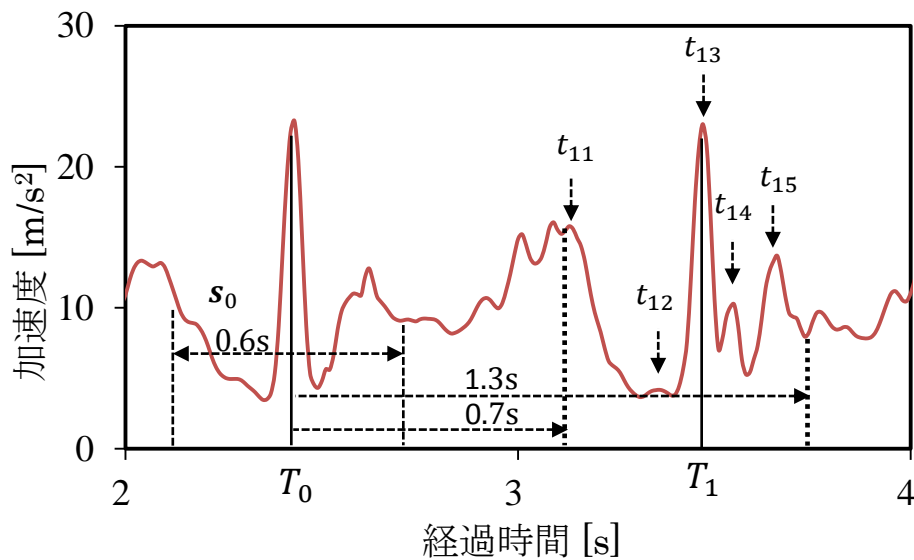


図 C-1 T_0 から一定時間内にある極大値とその時間

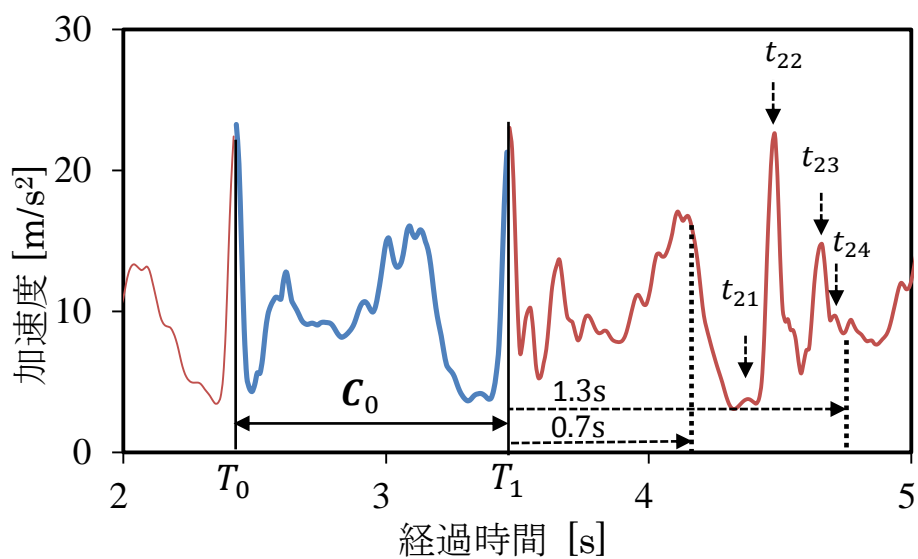


図 C-2 T_1 から一定時間内にある極大値とその時間

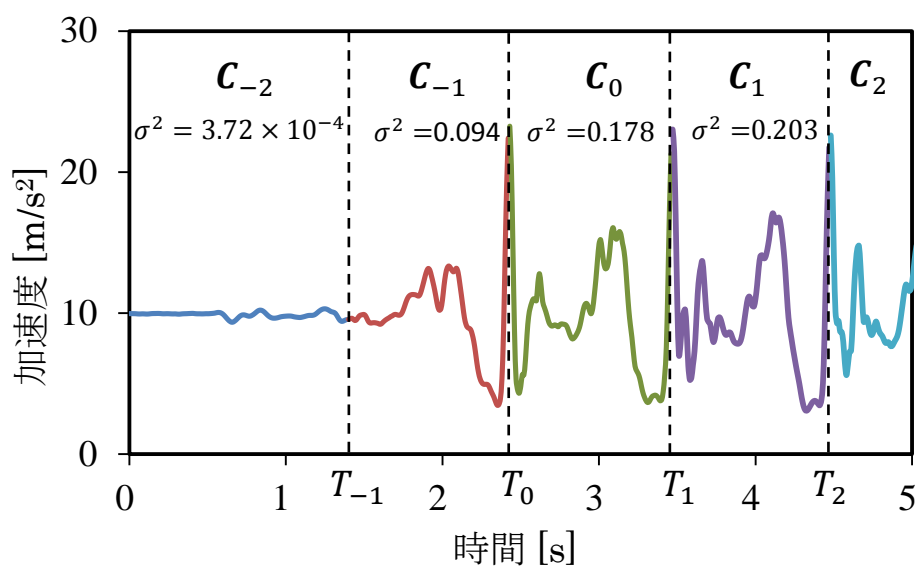


図 C-3 提案手法の適用による準周期信号の抽出例

表 C-1 準周期信号抽出に使用したパラメータ

パラメータ	設定値
X 軸方向加速度閾値	1.2G
加速度閾値からの探索時間	2.0 秒
極大値抽出範囲	0.7～1.3 秒後
正規化相互相関計算範囲	0.6 秒間
分散閾値	0.09

付録 D 単一センサ・単一軸信号による 認証度向上法の予備実験

本研究は各軸の信号の特徴量としてテンプレートと入力信号の信号間距離を採用し、テンプレートと入力信号が同一人物のものであるかを判定する 2 クラス機器別器を構成する。特徴量は、本研究においては 2 信号間の距離となる。したがって信号間距離は、同一人物同士の場合と、異なる人物の場合において明確に値の差が存在する距離計算法が望ましい。適切な距離計算法を採用することで、比較を行う 2 信号が同一人物である場合は小さな値となり、異なる人物の信号間距離は大きな値となることから、2 つのクラスの重なりがなくなり、優れた認証性能を示すことに繋がる。

本研究では EER を基に、各センサ各軸の信号において最適な距離計算法の検討を実施した。本実験で最終的に採用する単一軸の認証の流れを図 D-1 に示す。各ステップでは様々な計算方法やパラメータが最適な手法として採用する候補として考えられるが、それら全ての組み合わせを網羅することは組み合わせが膨大な数となり、検証は困難である。そのため、与える影響が大きいと考えられるステップから順番に、最も高い手法を順番に採用することとした。

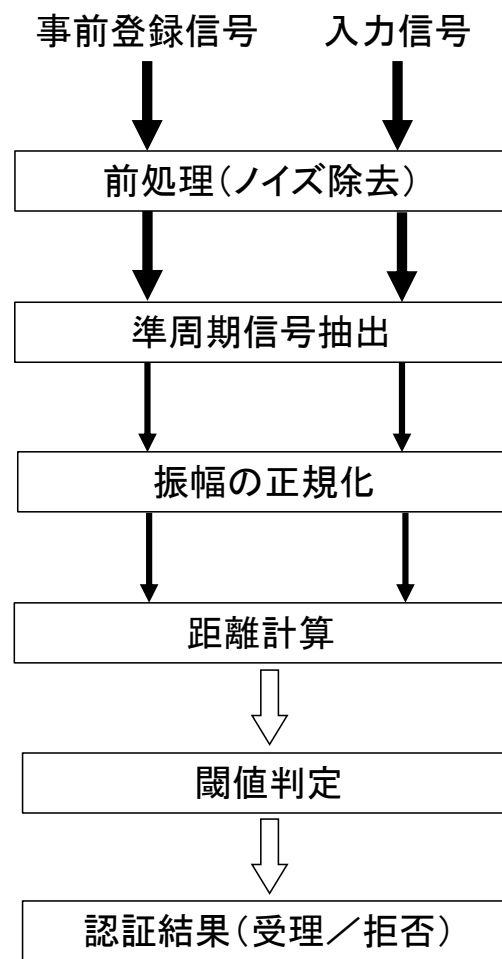


図 D-1 単一軸信号による認証処理のフロー

D.1 高精度化に寄与する信号の整合手法と距離計算法の検討

認証のための入力信号を \mathbf{X} ，テンプレートとして登録されている信号を \mathbf{Y} とする．2 信号を時系列データとして，以下のとおりに定義する．

$$\begin{aligned}\mathbf{X} &= \{x(i) | i = 1, 2, \dots, m\} \\ \mathbf{Y} &= \{y(j) | j = 1, 2, \dots, n\}\end{aligned}\tag{D.1}$$

ここで m と n は，それぞれ入力信号及びテンプレート信号のデータ長である．もしも，データの長さが常に等しいならば $m = n$ は常に成り立ち，以下の式で信号間距離は計算することが可能となる．しかしながら，歩行信号は歩く速度が常に変化することから， $m = n$ となることは一般的ではなく，歩行信号に対してこの手法を適用することができない．信号間距離を算出するためには，何らかの手法を用いて信号を伸縮し，同じ長さにする必要がある．本研究では，高精度な距離計算法を決定するために従来研究でも採用されてきた線形補間または DTW を適用して異なる長さの信号を整合し，高い精度で単一軸信号 2 信号間の距離計算法を検証した．

$\bar{\mathbf{X}}$ と $\bar{\mathbf{Y}}$ は線形補間により，信号の長さを等しくした信号 \mathbf{X}, \mathbf{Y} とし， $\bar{x}(i)$ 及び $\bar{y}(i)$ は線形補間で得られた i 番目の振幅値とする． $DTW(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ は整合手法として DTW を用いた \mathbf{X} と \mathbf{Y} の信号間距離とし， $D(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{Y}})$ は線形補間によりマッチングを行った信号間距離である．信号が長くなると計算される距離は同一人物間であっても大きくなるため，DTW と同様に信号長合計で割った距離を最終的な信号間距離とした．

テンプレート信号と入力信号の距離計算方法

本研究では単一センサ単一軸の信号に対して，最も高精度に認証が行える方法を検証するのが目的である．以下の距離（類似度）計算方法を適用して距離を求めた．

ユークリッド距離

最も用いられる 2 点間の距離を求める一般的な距離計算法である．線形補間及び，DTW の式において以下の式を導入する．

線形補間

$$\text{dist}(\bar{x}(i), \bar{y}(i)) = (\bar{x}(i) - \bar{y}(i))^2 \quad (\text{D.2})$$

DTW

$$\text{dist}(x(i), y(j)) = (x(i) - y(j))^2 \quad (\text{D.3})$$

最終的な信号間距離 $\text{Dist}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ は各距離計算法において以下の式に基づいて計算した.

線形補間

$$\text{Dist}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \begin{cases} \frac{\sqrt{D(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{Y}})}}{2m} & (m \geq n) \\ \frac{\sqrt{D(\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{Y}})}}{2n} & (m < n) \end{cases} \quad (\text{D.4})$$

DTW

$$\text{Dist}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sqrt{\text{DTW}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}}{m+n} = \frac{\sqrt{f(m, n)}}{m+n} \quad (\text{D.5})$$

マンハッタン距離 (絶対値差)

本人の認証においては距離の値そのものより, 本人間及び, 異なる人物間での距離の大小関係が重要となる. したがって, 値の大小関係には影響を与えないと考えられる平方根や 2 乗の計算をユークリッド距離から計算した絶対値差の総和が, 認証において用いられる. DTW 及び線形補間における項 $\text{dist}(x(i), y(j))$ に以下の式を導入する.

線形補間

$$\text{dist}(\bar{x}(i), \bar{y}(i)) = |\bar{x}(i) - \bar{y}(i)| \quad (\text{D.6})$$

DTW

$$\text{dist}(x(i), y(j)) = |x(i) - y(j)| \quad (\text{D.7})$$

正規化相互相関

2 つの信号の関係の強さを表す指標である. 歩行信号は, その時々によって歩く速度が異なるため, 振幅の値も異なる. したがって, 2 つの信号の類似性を評価する場合において, 距離という振幅の値そのものを評価する尺度ではなく, 2 信号の波形が如何に類似している

か、その相関関係を評価することが必要と考えられる。これを評価するため、正規化相互相関 $NCC(\bar{X}, \bar{Y})$ は、以下の式で計算される。

$$NCC(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{\langle \bar{X}, \bar{Y} \rangle}{\|\bar{X}\| \|\bar{Y}\|} \quad (D.8)$$

ただし

$$1 \geq NCC(\bar{X}, \bar{Y}) \geq -1$$

類似度を距離として評価するため、最終的な値は以下とした。

$$Dist(X, Y) = D(\bar{X}, \bar{Y}) = 1 - NCC(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (D.9)$$

正規化相互相関を基にした距離は 2 信号の長さが等しい必要がある。DTW による逐次計算は不可能であるため、距離計算を行わない。

実験と結果

表 1 にデータセットの設定を、表 2 に検証した周期の照合法と距離計算法の組み合わせを示す。フィルタなし、振幅の正規化なしの条件で、整合法及び距離計算法の各組み合わせにより EER を算出した結果を、表 D-3～表 D-4 に示す。認証精度の平均値を求めた結果は、「3 軸加速度差」が最も高精度で、次に「線形補間＋正規化相互相関に基づく距離」、わずかな差ではあるが、3 番目に「DTW＋マンハッタン距離」となった。この 3 種の距離計算法に対象に実験 D.2 を行う。

表 D-1 実験条件

条件	設定値
被験者数	50 人
信号の種類	6 種 (2 センサ×3 軸)
一被験者・センサ 1 軸あたりの信号数	30 周期 (60 歩)
サンプリング周波数	100Hz (間引きによる)

表 D-2 検証した整合法と距離計算法

	DTW	線形補間
ユークリッド	○	○
マンハッタン	○	○
正規化相互相関	×	○
3 軸角度差	○	×

○：検証，×：検証なし

表 D-3 DTW により整合を行い距離計算した EER[%]（フィルタなし，正規化なし）

センサ	軸	ユークリッド 距離	マンハッタン 距離	3 軸加速度 角度差
加速度 センサ	X	21.4	10.8	6.0
	Y	18.4	14.0	
	Z	20.5	13.9	
角速度 センサ	X	33.2	14.3	—
	Y	29.4	14.2	
	Z	29.3	20.3	

表 D-4 線形補間により整合を行い距離計算した EER[%]（フィルタなし，正規化なし）

センサ	軸	ユークリッド 距離	マンハッタン 距離	正規化相互相関に 基づく距離
加速度	X	21.2	15.2	19.0
	Y	14.4	13.6	8.5
	Z	18.7	14.1	12.1
角速度	X	16.4	14.6	11.9
	Y	19.6	15.8	16.8
	Z	19.0	15.4	9.8

D.2 高精度化に寄与する振幅の正規化手法の検討

最適な振幅の正規化方法を決定するために、実験 D.1 の実験結果を基に振幅の正規化を行う。本研究においては、振幅正規化せずに距離計算を行う計算法を含む、付録 A の実験でも採用した 4 種類の正規化法を、マンハッタン距離と DTW を組み合わせた計算法に導入した。フィルタなしは D.1 の実験の DTW とマンハッタン距離で求めた EER である。参考のために記載する。なお、3 軸加速度及び、正規化相互相関は振幅の値により距離を求める計算法ではないので、正規化は不要であり、評価実験は実施しない。

- 振幅正規化なし
- MAX
- PP
- RMS

結果

結果を表 D-5 に示す。加速度 X 軸を除く全てのセンサの各軸において RMS が最も高い精度を示した。また、センサごとに認証精度の平均を算出した場合、RMS は、他の正規化法と比較して、どちらのセンサにおいても高精度に認証できる結果を得ることができた。更に、RMS の認証精度は「正規化相互相関に基づく距離」の認証精度と比較した場合、全ての軸の信号において上回る事となった。

これらの結果より、両センサにおける単一軸の信号による認証方法としては、「RMS 正規化」・「DTW による整合」・「マンハッタン距離」を組み合わせた距離計算法を採用する。

表 D-5 正規化手法ごとの EER[%]

センサ	軸	正規化なし	MAX	PP	RMS
加速度	X	10.8	19.5	25.0	9.8
	Y	14.0	15.8	15.8	5.9
	Z	13.9	12.1	9.7	5.3
角速度	X	14.3	12.8	10.3	7.1
	Y	14.2	11.8	10.2	8.7
	Z	20.3	13.9	12.8	7.8

D.3 高精度化に寄与するフィルタ点数の検討

決定した正規化方法に対してフィルタ点数を変化させ、最適な Savitzky–Golay 法の点の数を決定した。「RMS 正規化」を適用した各準周期信号に、「DTW による整合」と「マンハッタン距離」による信号間の距離計算方法を行って計算を行う。求めた距離に閾値を設定することで、EER を求めた。なお、各サンプルにおけるフィルタ係数については文献[99]に記載の式を基に計算を行った。

結果

各点数において求めた EER を表 D-6, D-7 に示す。提案する 3 軸加速度方向による認証法についても記載した。

センサの単一軸の信号間で距離計算及び 3 軸加速度角度差による距離計算手法の両方において 9 点の時に 1.0%~0.3%の範囲で精度の向上が認められた。9 点から更に点数を増やした 11 点では精度が低下する結果となった。このため、単一軸による認証の場合は、全て 9 点が最も高い精度が得られるフィルタの点数とした。

参考のため、D-8 に線形補間と正規化相互相関を適用して求めた類似度に対して閾値処理を適用して認証精度を評価した結果を示す。本研究で採用するフィルタ・RMS 振幅正規化・DTW による信号の整合・マンハッタン距離を組み合わせによる認証は、従来研究で採用されることの多い、線形に信号長を合わせた信号間の類似度を正規化相互相関により計算する手法より高い精度が得られていることが分かる。

表 D-6 単一センサ単一軸の信号におけるフィルタ点数ごとの EER[%]

センサ	軸	フィルタ なし	5 点	7 点	9 点	11 点
加速度	X	9.8	9.4	9.3	8.8	9.7
	Y	5.9	5.9	5.8	5.3	5.9
	Z	5.3	5.3	5.1	4.6	5.2
角速度	X	7.1	7.1	7.0	6.6	7.1
	Y	8.7	8.7	8.7	8.2	8.8
	Z	7.8	7.8	7.7	7.4	7.5

表 D-7 加速度 3 軸角度差における Savitzky-Golay の点数ごとの EER[%]

	フィルタ なし	5 点	7 点	9 点	11 点
3 軸加速度角度差	6.0	6.0	5.9	4.8	5.5

表 D-8 線形補間と正規化相互相関の組み合わせによる EER[%]

センサ	軸	EER
加速度	X	21.3
	Y	9.2
	Z	13.7
角速度	X	11.2
	Y	16.2
	Z	9.8

D.4 まとめ

各センサ各軸における最適な認証法を決定するために予備実験を行った。これらの検討の結果、各センサ各軸の信号を用いた単一軸信号の距離計算法について表 D-9 に示す手法を採用することとした。

表 D-9 本検討により採用した、単一軸信号における距離計算法

設定	設定値
Savitzky–Golay フィルタ	9 点
振幅の正規化	RMS
信号の整合法	DTW
距離計算法	マンハッタン距離

付録 E 実環境を模擬したデータセットにおける単一軸信号認証精度の評価

4章の実験2では実際の使用環境を模擬するために、各被験者4回の計測を行い、各計測の開始前にポケットに端末の出し入れを行った。この操作により、ポケット内での端末の位置やセンサの各軸の向きにずれが生じる可能性が存在し、提案手法の有効性を確認するためのデータセットとすることができる。しかしながら、この実験のために収集したデータセットは実験2において非常に高い精度を示しており、端末の出し入れによる影響が非常に小さく、高い精度で認証できるデータセットであった可能性も存在する。単一軸の信号を基にした認証精度を評価することで、センサ端末のポケットからの出し入れの影響は存在する信号であるかを検証した。単一軸による認証において精度の低下が認められれば、端末の出し入れは認証精度に影響を与えたと推測でき、高い精度で認証が可能であったならば、センサ出し入れの影響は小さいデータセットであると推測することができる。

実験方法

使用するデータセットは4章の実験2で収集したものである。被験者数は17人、各被験者につき4回の計測を実施し、計測の度にセンサ端末をポケットから取り出し、センサを視認した後に、ポケットに戻す操作を行っている。

認証精度を評価するために、50人の被験者において単一センサ単一軸信号を基にした認証法として最高精度を示したDTWによる手法及び、線形補間と正規化相互相関による認証法を適用し、収集したデータセットの評価を行った。この認証法の設定条件について表E-1に示す。

実験結果

本実験データセットによるEERを表E-2, 3に示す。被験者50人のデータセットにおいて単一センサ単一軸信号を基にした表D-6・8と比較を行う。本実験のデータセットは被験者数が約1/3の17人である。しかしながら、各センサ各軸のEERを比較すると、認証精度が著しく向上した信号軸は存在せず、逆に認証精度が低下（EERは上昇）した信号軸も

存在する. この結果から, 本研究のために収集した被験者数 17 人のデータセットは, 偶然, 高精度に認証可能な信号を測定できたとは推測し難く, 逆にセンサ端末のポケットからの出し入れに伴い, その装着位置に変化が生じ, 認証精度は低下するという結果になったと推察できる.

E-1 DTW 距離を基にした認証法の設定条件

設定	設定値
Savitzky–Golay フィルタ	9 点
振幅の正規化	RMS
信号の整合法	DTW
距離計算法	マンハッタン距離

E-2 本研究で採用した DTW と最適な距離計算法による EER

センサ	軸	EER[%]
加速度	X	6.6
	Y	10.4
	Z	5.4
角速度	X	6.1
	Y	6.9
	Z	12.3

表 E-3 線形補間と正規化相互相関の組み合わせによる EER

センサ	軸	EER[%]
加速度	X	19.2
	Y	7.4
	Z	13.1
角速度	X	8.7
	Y	10.6
	Z	12.7

参考文献

- [1] Qrio 株式会社 : SmartLock, <http://qrio.me/smartlock/>, (参照 2015-11-1)
- [2] CNET Japan : ヒルトン、スマートフォンがホテルの鍵になる技術を発表,
<http://japan.cnet.com/news/service/35051502/>, (参照 2015-1-27).
- [3] WIRED : スマホと Bluetooth を使用したキーレス・チェックイン始まる,
<http://wired.jp/2014/12/07/keyless-mobile-entry/>, (参照 2015-1-27).
- [4] マイナビニュース:スマホにロックをかける人はわずか半数 - Google の Android セキュリティ戦略:<http://news.mynavi.jp/articles/2014/10/29/android/> (参照 2015-1-27).
- [5] ITmedia : 調査レポート,ケータイのセキュリティロック、利用率が最も高い世代は,
<http://www.itmedia.co.jp/promobile/articles/0912/18/news082.html>, (参照 2015-1-27).
- [6] ITmedia : 指紋、顔、虹彩そろい踏み—富士通の 2015 年秋冬 PC・タブレット・スマホの生体認証機能, http://image.itmedia.co.jp/l/im/mobile/articles/1510/06/l_si-Fa-16.jpg, (参照 2015-11-01).
- [7] Akl, A., Feng, C. and Valaee, S.: A Novel Accelerometer-Based Gesture Recognition System., IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.59, No.12, pp.6197-6205 (2011).
- [8] 石原進, 太田雅敏, 行方エリキ, 水野忠則: 端末自体の動きを用いた携帯端末向け個人認証, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12 (2005).
- [9] 濱野雅史, 新井イスマイル: 加速度センサ・ジャイロセンサを併用したスマートフォンの利用認証手法の提案: 情報処理学会研究報告 MBL, Vol.70, No.17 (2014).
- [10] 松尾賢治, 久保田彰, 奥村文教, 橋本真幸, 小池淳, 羽鳥好: 腕の振りに基づく生体認証とテンプレート更新による経時変化の抑制, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J91-B, No.6, pp.695-705 (2008)
- [11] Jiayang, L., Lin, Z., Jaehan, W., Venu, V.: uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications, Pervasive and Mobile Computing, Vol.5, No.6, pp.657-675 (2009).
- [12] 喜田義弘, 神里麗葉, 朴美娘, 岡崎直宣: マルチタッチ操作を利用したリズム認証方式

- の検討, 情報処理学会研究報告 MBL, Vol70, No19, pp.1-7 (2014).
- [13] 三上一憲, 林原尚浩: タッチパネルと加速度センサを用いた携帯端末向けジェスチャ認証とその入力方式の提案, 情報処理学会研究報告 DPS, Vol.150, No.8, pp.1-7 (2012).
- [14] ITmedia: グーグル、「Android 4.0」発表—UI、カメラ、ブラウザなどを一新, <http://www.itmedia.co.jp/mobile/articles/1110/19/news062.html>, (参照 2015-11-1)
- [15] 厚生労働省, 平成 25 年国民健康・栄養調査結果の概要: <http://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-10904750-Kenkoukyoku-Gantaisakukenkouzoushinka/0000068070.pdf>, (参照 2015-1-27).
- [16] 澤田武士, 柳原正, 三宮千尋ほか: 加速度センサの装着依存性が小さい歩行認証技術の研究, 第 18 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.394-397 (2013).
- [17] 中西功, 宮本 千正, 馬場 貞尚: メンタルタスク時の脳波を用いた個人認証の研究, コンピュータセキュリティシンポジウム 2009 (CSS2009) 論文集, Vol.2009, pp.1-6 (2009)
- [18] 山口利恵: 次世代認証技術とプライバシー保護, <http://www.sict.i.u-tokyo.ac.jp/news/sympo20131028/yamaguchi.pdf>, (参照 2015-11-1).
- [19] 瀬戸洋一: バイオメトリクスを用いた本人認証技術, 計測と制御, Vol.37, No.6, pp.395-401 (1998).
- [20] Jain, K., Ross, A., Nandakumar, K.: *Introduction to Biometrics*, pp.10-12, Springer (2011).
- [21] 半谷精一郎: バイオメトリクス教科書, コロナ社 (2012).
- [22] 村上隆夫, 高橋健太, 松浦幹太: ID レス生体認証における最適な逐次融合判定について, 電子情報通信学会バイオメトリクス研究会資料, BioX2013-11, pp.34-39 (2013).
- [23] 石井健一郎ら: パターン認識, pp.1, オーム社 (1998).
- [24] Jain, K., Ross, A. A., Nandakumar, K.: *Introduction to Biometrics*, pp.3, Springer (2011).
- [25] 半谷精一郎: バイオメトリクス教科書, pp.2, コロナ社 (2012).
- [26] ATR-Promotion: TSND121 仕様, <http://www.atr-p.com/products/TSND121.html>, (参照 2015-11-2).
- [27] 小林哲二: 細線化画像パターンマッチングによる指紋照合, 電子情報通信学会論文誌.D, Vol.J79-D-2, No.3, pp. 330-340 (1996).

- [28] 梅崎太造, 斉藤省三, 木村聡仁, 松本憲行: 画像品質の変動を考慮した指紋照合法, 電気学会論文誌 C, Vol. 122, No.7, pp.1127-1136 (2002).
- [29] 笹川耕一: 指紋による個人認証, 生体医工学, Vol.44, No.1, pp.15-19 (2006).
- [30] 森田歩, 伊藤康一, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, 樋口龍雄: 位相限定相関法と特徴点マッチングの組み合わせに基づく指紋照合アルゴリズム, 情報科学技術フォーラム一般講演論文集, Vol.4, No.3, pp.51-54 (2005).
- [31] Wanga, L., Leedhamb, G., Cho, D. S.: Minutiae feature analysis for infrared hand vein pattern biometrics, Pattern Recognition, Vol. 41, No.3, PP. 920–929 (2008).
- [32] Palm vein verification system based on SIFT matching, Proc. of 3rd IEEE International Conference on Biometrics(ICB2009), pp.1290-1298 (2009).
- [33] Ratanamahatana, C. A., Keogh, E.: Everything you know about Dynamic Time Warping is Wrong, in conjunction with the International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (2004).
- [34] 櫻井保志, Christos Faloutsos, 山室雅司: ダイナミックタイムワーピング距離に基づくストリーム処理, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J92-D, No.3, pp.338-350 (2009).
- [35] Henniger, O., Muller, S.: Effects of Time Normalization on the Accuracy of Dynamic Time Warping, Proc. of first IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS 2007), pp.27-29 (2007).
- [36] Seiichiro, H., Tomoaki, S., Takahiro, Y.: A Comparison of Three Kinds of DP Matching Schemes in Verifying Segmental Signatures, Joint COST 2101 and 2102 International Conference, BioID_MultiComm 2009, pp 333-339 (2009).
- [37] Patel. K., S. L. Lahudkar: Automatic Speaker Recognition using LPCC and MFCC, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, Vol.3, No.4,pp.2106-2109 (2015).
- [38] Patel. K., Prasad R. K.: Speech Recognition and Verification Using MFCC & VQ, International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE), Vol.1, No.7, (2013).
- [39] Jain, A., Uludag, U., and Ross, A.: Biometric Template Selection: A Case Study in Fingerprints, Proc. of 4th International Conference on Audio-and Video-Based

Person Authentication (AVBPA), pp.335-342 (2003).

- [40] 坂野鋭：パターン認識における主成分分析－顔画像認識を例として－，統計数理，vol.49, No.1, pp.23-42 (2001).
- [41] Turk, M.A. and Pentland, A.P.: Face recognition using eigenfaces, Computer Vision and Pattern Recognition, Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586-591 (1991).
- [42] Jain, A. K., Ross, A. A., and Prabhakar, S.: An Introduction to Biometric Recognition, IEEE Transactions Circuits and Systems for Video, Vol.14, No.1, pp.4-20 (2004).
- [43] Fernando, A. et al.: Dealing with sensor interoperability in multi-biometrics: The UPM experience at the Biosecure multimodal Evaluation 2007, Proc. of SPIE Defense and Security Symposium, Workshop on Biometric Technology for Human Identification, pp.69440J-69440J (2008).
- [44] 樋口輝幸：ハイブリッド指スキャナとマルチモーダル生体認証技術，NEC 技報パブリックセーフティを支える要素技術・ソリューション特集，Vol.63, No.2, pp.22-25 (2010).
- [45] 市野将嗣，坂野鋭，小松尚久：唇動作と音声を用いたカーネル判別分析による個人認証方式，電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J92-D, No8, pp.1363-1372 (2009).
- [46] Fierrez-Aguilara, J., Ortega-Garciaa, J. , Gonzalez-Rodrigueza, J., Bigunb, J.: Discriminative multimodal biometric authentication based on quality measures, Pattern Recognition, Vol.38, No.5, pp.777-779 (2005).
- [47] Boehnen, C., Barstow, D., Patlolla, D., Mann, C.: A multi-sample standoff multimodal biometric system, Proc. of IEEE Fifth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS2012), pp.127-134 (2012).
- [48] 木村卓弘，槇原靖，村松大吾，八木康史：歩容・顔・身長によるマルチモーダル個人認証のための時間解像度に適応的なスコア統合，情報処理学会研究報 CVIM, Vol.192, No.12, pp.1-8 (2014).
- [49] 半谷精一郎：バイオメトリクス教科書，pp.140-144，コロナ社 (2012).
- [50] Jain, K., Ross, A. A., Nandakumar, K.: *Introduction to Biometrics*, pp.209-253, Springer (2011).

- [51] Verlinde, P., Druyts, P., Chollet, G., Acheroy, M.: Applying Bayes based classifiers for decision fusion in a multi-modal identity verification system, Proc. of International Symposium on Pattern Recognition, (1999)
- [52] Kittler, J., Hatef, M., Duin, R.P., Matas, J.G.: On combining classifiers, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol.20, No.3, pp.226-239 (1998).
- [53] Verlinde, P., Chollet, G.: Comparing decision fusion paradigms using k-NN based classifiers, decision trees and logistic regression in a multi-modal identity verification application, Proc. of Second International Conference on Audio and Video-Based Biometric Person Authentication (AVBPA), pp.188-193 (1999).
- [54] Yacoub, S. B.: Multi-Modal Data Fusion for Person Authentication using SVM, Proc. 2nd Intelligent Conference Audio-Video Based Biometric Person Authentication, pp.25 -30 (1999).
- [55] Brummer, N. et al.: Fusion of heterogeneous speaker recognition systems in the STBU submission for the NIST speaker recognition evaluation 2006, IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, Vol.15, No.7, pp. 2072-2084 (2007).
- [56] 古井貞熙：音声情報処理，森北出版（2007）
- [57] 嵯峨山茂樹，古井貞熙：ラグ窓を用いたピッチ抽出の一方法，電子通信学会総合全国大会，5-263（1978）.
- [58] Paul Boersma and David Weenink: Praat, <http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>, (参照 2015-11-27) .
- [59] Md. Altab, H., Makihara, Y., Junqiu, W., and Yagi, Y.: Clothing-invariant gait identification using part-based clothing categorization and adaptive weight control, Pattern Recognition, Vol.43, No.6, pp.2281-2291 (2010).
- [60] 万波秀年，槇原靖，八木康史：歩容における性別・年齢の分類と特徴解析，電気通信情報学会論文誌 D，Vol.J92-D，No.8，pp.1373-1382（2009）.
- [61] Akae, N., Makihara Y., and Yagi, Y.: The Optimal Camera Arrangement by a Performance Model for Gait Recognition, Proc. the 9th IEEE Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp.292-297 (2011)

- [62] Muramatsu, D., Iwama, H., Makihara, Y., and Yagi, Y.: Multi-view Multi-modal Person Authentication from a Single Walking Image Sequence, Proc. of the 6th IAPR International Conference on Biometrics, pp.1-8 (2013).
- [63] Lee, T., Ranganath, S., and Sanei, S.: Fusion of chaotic measure into a new hybrid face-gait system for human recognition, Proc. of the 18th International Conference on Pattern Recognition, Vol.4, pp.541–544 (2006).
- [64] Xhiali, Z., Bir, B.: Feature fusion of side face and gait for video-based human identification, Pattern Recognition, Vol.41, pp.778-795 (2008).
- [65] 武田隆宏, 倉本圭, 小橋 昌司, 畑豊: 左右の足底圧力分布の動的変化に基づく生体認証, 日本知能情報ファジィ学会第 27 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 99.1393-1398 (2011).
- [66] 田村充, 井上裕美子: 歩行動作の個人差を示す足底厚圧分布情報の抽出, 日本人間工学会関西支部大会講演論文集, Vol.2011,, pp.139-140 (2011).
- [67] 山本有華里, 谷口忠大: 足底圧情報からの歩行判別手法についての研究, 第 38 回知能システムシンポジウム資料, Vol.38, pp.83-288 (2011).
- [68] Soumik Mondal, Anup Nandy, Pavan Chakraborty, G.C.Nandi: Gait Based Personal Identification System Using Rotation Sensor, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, Vol.3, No.3, pp.395-402(2012).
- [69] 寺田周平, 榎本裕亮, 塙大, 小口喜美夫: ウェアラブルセンサを用いた歩行認証法の検討, 電子情報通信学会総合大会, B-18-1 (2011).
- [70] Yuting, Z., Gang, P., Kui, J., Minlong, L., Yueming, W., Zhaohui, W.: Accelerometer-based Gait Recognition by Sparse Representation of Signature Points with Clusters, Proc. of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp.91-98 (2014).
- [71] 岩本健嗣, 杉本大輔, 松本三千人: 3 軸加速度センサを用いた歩行者推定法, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.2, pp.739-749 (2014).
- [72] 笠原弘樹, 市野将嗣, 吉井英樹, 鶴丸和宏, 甲藤二郎, 小松尚久: 携帯端末の加速度センサを用いた歩行認証に関する検討, 2013 年 暗号と情報セキュリティシンポジウム (SCIS2013), 3D1-4 (2013).
- [73] Claudia, N., Holger, B., Christoph B.: Benchmarking the performance of SVMs and

- HMMs for accelerometer-based biometric gait recognition, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), pp.281-286 (2011).
- [74] Gafurov, D., Helkala, K. and Sondrol, T.: Gait recognition using acceleration from MEMS, Proc. IEEE International Conference on Availability, Reliability and Security, pp.479-488 (2006).
- [75] Gracian, T., Alberto A. and Gonzalo, B.: Application of the computational theory of perceptions to human gait pattern recognition, Pattern Recognition, Vol.43, pp.2572-2581 (2010).
- [76] Derawi, M. O., Bours, P. and Holien, K.: Improved Cycle Detection for Accelerometer Based Gait Authentication, Proc. of the 6th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP '10), pp.312-317 (2010).
- [77] Mäntyjärvi, J. et al.: Identifying users of portable devices from gait pattern with accelerometers, Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.973-976 (2005).
- [78] 山野井祐介, 沼尾雅之 : 一般動作の加速度データによるユーザ識別システムの提案, 第 73 回全国大会講演論文集, pp.295-296 (2011)
- [79] Hong, L., Jonathan, H., Tanwistha, S., Lama, N.: Unobtrusive Gait Verification for Mobile Phones, Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers, pp. 91-98 (2014).
- [80] Gafurov, D., Sneekenes, E. and Buvarp, T.E.: Robustness of biometric gait authentication against impersonation attack, Proc. of the 1st International Workshop on Information Security (IS'06), OnTheMove Federated Conferences (OTM'06), Vol.4277, pp.479-488 (2006).
- [81] Gafurov, D., Sneekenes, E., Bours, P.: Gait authentication and Identification using wearable accelerometer sensor, Proc. of IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies, pp.220-225 (2007).
- [82] Claudia, N., Christoph B., Sathyanarayanan, R., Manuel, M.: Using Hidden Markov Models for Accelerometer-Based Biometric Gait Recognition, in Proc. of

- the 7th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications, pp.58-63 (2011).
- [83] Rong, L., et al.: A wearable acceleration sensor system for gait recognition, Proc. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp.2654-2659 (2007).
 - [84] Derawi, M. O., Claudia, N., Patrick, B., and Christoph, B.: Unobtrusive user authentication on mobile phones using biometric gait recognition, in Proc. of the 6th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, pp.306–311(2010).
 - [85] Rong, L., Zhou, J.: Identification of individual walking patterns using gait acceleration, Proc. of 1st International Conference in Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp.543–546 (2005).
 - [86] 石井健一郎ら：パターン認識，pp.12，オーム社（1998）.
 - [87] Okumura, F., Kubota, A., Hatori, Y., Matsuo, K., Hashimoto, M. and Koike, A: A Study on Biometric Authentication based on Arm Sweep Action with Acceleration Sensor, Proc. of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications, 2006(ISPACS '06), pp.219-222 (2006).
 - [88] Savitzky, A. and Golay, M.J.E.: Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures, Anal. Chem. Vol.36 , No.8, pp.1627–1639 (1964).
 - [89] 村松大吾, 本郷保範, 松本隆: ユーザ共通 Fusion モデルを用いたオンライン署名認証, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D, No.2, pp.450-459 (2007).
 - [90] 村松大吾, 岩間晴之, 木村卓弘ほか：一歩行映像から取得される複数特徴を用いた個人認証, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J97-A, No.12, pp.735-748 (2014).
 - [91] Veropoulos, K. , Campbell, C. , Cristianini, N.: Controlling the sensitivity of support vector machines, Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.55-60 (1999).
 - [92] Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., Kegelmeyer, W. P.: SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique, Journal of Artificial Intelligence Research, Vol.16, pp.321-357 (2002) .
 - [93] 株式会社レイ・アウト, ハードケース RT-XA4C3 シリーズ : <http://www.ray-out.co.jp/products/xa4c3/>, (参照 2015-11-03).

- [94] 富士通, ARROWS NX F-04G > スペック : http://www.fmworld.net/product/phone/f-04g/spec.html?fmwfrom=f-04g_iris, (参照 2015-8-3)
- [95] 高田耕太郎, 安保雅博: 小型三次元加速度計を用いた歩行評価の臨床的有用性の検討, 東京慈恵会医科大学雑誌、Vol.119, No.5, pp.331-338 (2004).
- [96] 大瀧保明, 佐川貢一, 猪岡光: 加速度センサとジャイロを用いた連続歩行分析アルゴリズム, 日本機械学会論文集 C, Vol. 67, No. 655, pp.782-788 (2001).
- [97] Mummolo, C., Mangialardi, L., and Kim, J. H.: Quantifying Dynamic Characteristics of Human Walking for Comprehensive Gait Cycle, Journal of Biomechanical Engineering, Vol.135, No.9 (2013).
- [98] 大内一成: 実世界に広がる装着型センサを用いた行動センシングとその応用: 4. スマートフォンを用いた生活行動認識-家の中も外もスマホで行動認識-, 情報処理, Vol.54, No.6, pp.578-581 (2013).
- [99] Hannibal H. Madden: Comments on the Savitzky-Golay convolution method for least-squares-fit smoothing and differentiation of digital data, Analytical Chemistry, No.50, Vol.9, pp 1383-1386(1978).

研究業績

論文（査読有）

1. 今野慎介, 中村嘉隆, 白石陽, 高橋修： 複数のウェアラブルセンサを用いた歩行動作による本人認証法の精度向上, 情報処理学会論文誌, vol.57, No.1, pp.109-122 (2016).
2. Shinsuke Konno, Yoshitaka Nakamura, Yoh Shiraishi, and Osamu Takahashi: Improvement of Accuracy based on Multi-Sample and Multi-Sensor in the Gait-based Authentication using Trouser Front-Pocket Sensors, International Journal of Informatics Society, vol.8 (2016). (to appear)

国際学会（査読有）

1. Shinsuke Konno, Yoshitaka Nakamura, Yoh Shiraishi, and Osamu Takahashi: Gait-based Authentication using Trouser Front-Pocket Sensors, Proceedings of the International Workshop on Informatics (IWIN 2015), pp.125-130 (September 2015).

口頭発表

1. 今野慎介, 高橋修：加速度センサを用いた歩行動作による本人認証法, 第 75 回情報処理学会全国大会講演論文集, pp.57-58 (2013).
2. 今野慎介, 中村嘉隆, 白石陽, 高橋修：ウェアラブルセンサを用いた歩行認証方法の検討, 第 74 回情報処理学会 MBL 研究発表会, Vol. 2015-MBL-74, No.25, pp.1-8 (2015).

受賞

1. 2015 年 9 月 8 日, IWIN2015 Excellent Paper Award, Gait-based Authentication using Trouser Front-Pocket Sensors